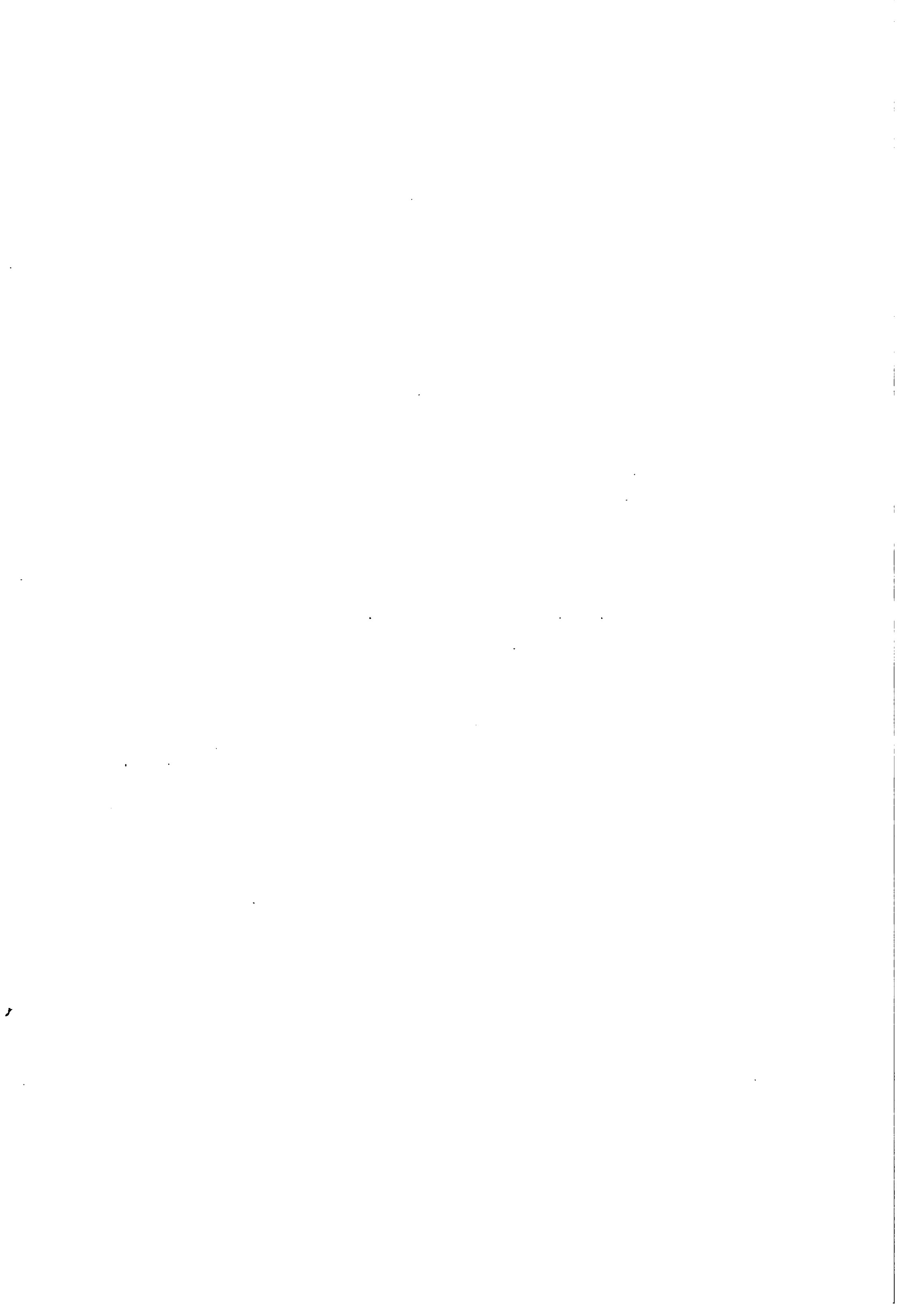



ACADEMIAE HARVARDIANAE
ET
VE RI TAS
CHRISTO ECCLESIAE
SIGILLUM NOV·ANG·





VORTRÄGE

ÜBER

AKUSTIK.

GEHALTEN AM CONSERVATORIUM DER GESELLSCHAFT DER MUSIKFREUNDE IN WIEN

VON

L. A. ZELLNER.

ZWEI BÄNDE.

MIT 331 ABBILDUNGEN, VIELEN NOTENBEISPIELEN UND ILLUSTRATIONEN IM TEXTE, XX BEILAGEN UND EINEM ANHANGE ÜBER BESTIMMUNG ABSOLUTER SCHWINGUNGSZAHLEN.

ERSTER BAND.



WIEN, PEST, LEIPZIG.
A. HARTLEBEN'S VERLAG.
1892.

Druck von Friedrich Jasper in Wien.

Vorwort.

Die vorliegende Arbeit will nicht als ein Lehrbuch der Akustik angesehen sein.

Eingedenk der über diesen Wissenszweig vorhandenen reichen Ergebnisse tiefer, glänzender Forschung, konnte mir nichts ferner liegen, als die Absicht, ein solches Buch zu schreiben, wozu nur der berufen sein kann, dem jenes Maass exacter und insbesondere mathematischer Kenntnisse nebst Zeit und Mitteln zu Gebote stehen, um von Anderen bereits durchmessene Strecken zum Ausgangspunkt nehmend, den Pfad eigener Forschung mit Aussicht auf Erfolg betreten und verfolgen zu können.

Man wird also hier fast nur fremdem Gut und zum allergeringsten Theile Ergebnissen eigener Beobachtung begegnen.

Daraus erwächst mir aber die Pflicht, das Entstehen dieser Vorträge zu rechtfertigen.

Als im Jahre 1868 an mich der Ruf ergangen war, an der Neuorganisation des hiesigen Conservatoriums theilzunehmen, wurde in den neuen Lehrplan nebst anderen wissenschaftlichen Disciplinen auf meinen Antrag auch die der Akustik aufgenommen, zu deren alsbaldigen Activirung zudem die beste Aussicht vorhanden war, indem Dr. Pisko[1]), damals Professor der Physik an der Wiedener-Oberrealschule, sich bereit erklärt hatte, am Conservatorium regelmässige Vorträge zu halten.

Seine kurz darauf erfolgte Ernennung zum Director der Fünfhauser Oberrealschule liess ihn jedoch zur Ausführung seines Vorhabens nicht gelangen.

---

[1]) † 26. Juni 1888.

Anderweite in dieser Hinsicht unternommene Schritte ergaben negative Resultate. Mit sporadischen, wenn auch noch so interessanten Vorträgen über einzelne akustische Themata[1]) aber war der angestrebte Zweck, dem Schüler in das gesammte Gebiet der Klanglehre genügenden Einblick zu verschaffen, nicht zu erreichen.

So entschloss ich mich denn, selbst den Versuch zu machen, den Gegenstand systematisch vorzutragen, wozu die bei meinen, einige Jahre früher begonnenen Vorträgen über Orgelbau gemachte Erfahrung: wie schwer es meinen Hörern oft wurde, den Zusammenhang von Erscheinungen zu erfassen, deren Verständniss das Vertrautsein mit den Lehren der Akustik bedingt, — mitbestimmend beitrug.

Auch boten mir die Vorarbeiten für die internationale Stimmtonconferenz (1885), mit welchen betraut zu werden mir die Ehre zu Theil geworden war, Gelegenheit zu vielfacher theoretischer wie experimenteller Umschau auf diesem Gebiete, was zu einer Sammlung von Apparaten führte, die mich in den Stand setzten, meinen Zuhörern manchen akustischen Lehrsatz durch das Experiment erläutern zu können.

So entstanden diese Vorträge und so entstand dieses Buch, das also weiter nichts sein soll, als ein Nachschlagebuch für meine Hörer und vielleicht auch ein praktischer Wegweiser für Solche, welche beabsichtigen, ähnliche Vorträge an musikalischen Instituten zu halten. —

Die Vorträge sind genau in der Art wiedergegeben, wie ich sie thatsächlich halte, und so abgetheilt, dass *ein* Vortrag mit Einschluss der Experimente die Dauer einer Stunde nicht, oder wenigstens nicht erheblich überschreitet. Für Jünger der Tonkunst bestimmt, deren Zeit vom Hauptstudium ohnehin stark in Anspruch genommen ist, durften die Vorträge, ohne abzuspannen und damit den Lehrzweck zu verfehlen, weder zu lang noch zu abstract sein; durch häufiges Experimentiren sollten sie anregend, überzeugend, durch stete Beziehung zur Musik für den Beruf meiner Hörer möglichst nutzbringend werden.

Hinsichtlich der Anordnung des Stoffes habe ich es vorgezogen, die menschliche Stimme im physikalischen Theile unter den ton-

---

[1]) Solche hielten die Herren: Dr. Franz *Gehring* († 4. Jänner 1884), Dr. Guido *Adler* und Dr. Robert *Hirschfeld*.

gebenden Körpern zu behandeln, die Betrachtungen über die Functionen des Ohres, als percipirendes Organ, dagegen in den analytischen Theil zu verlegen.

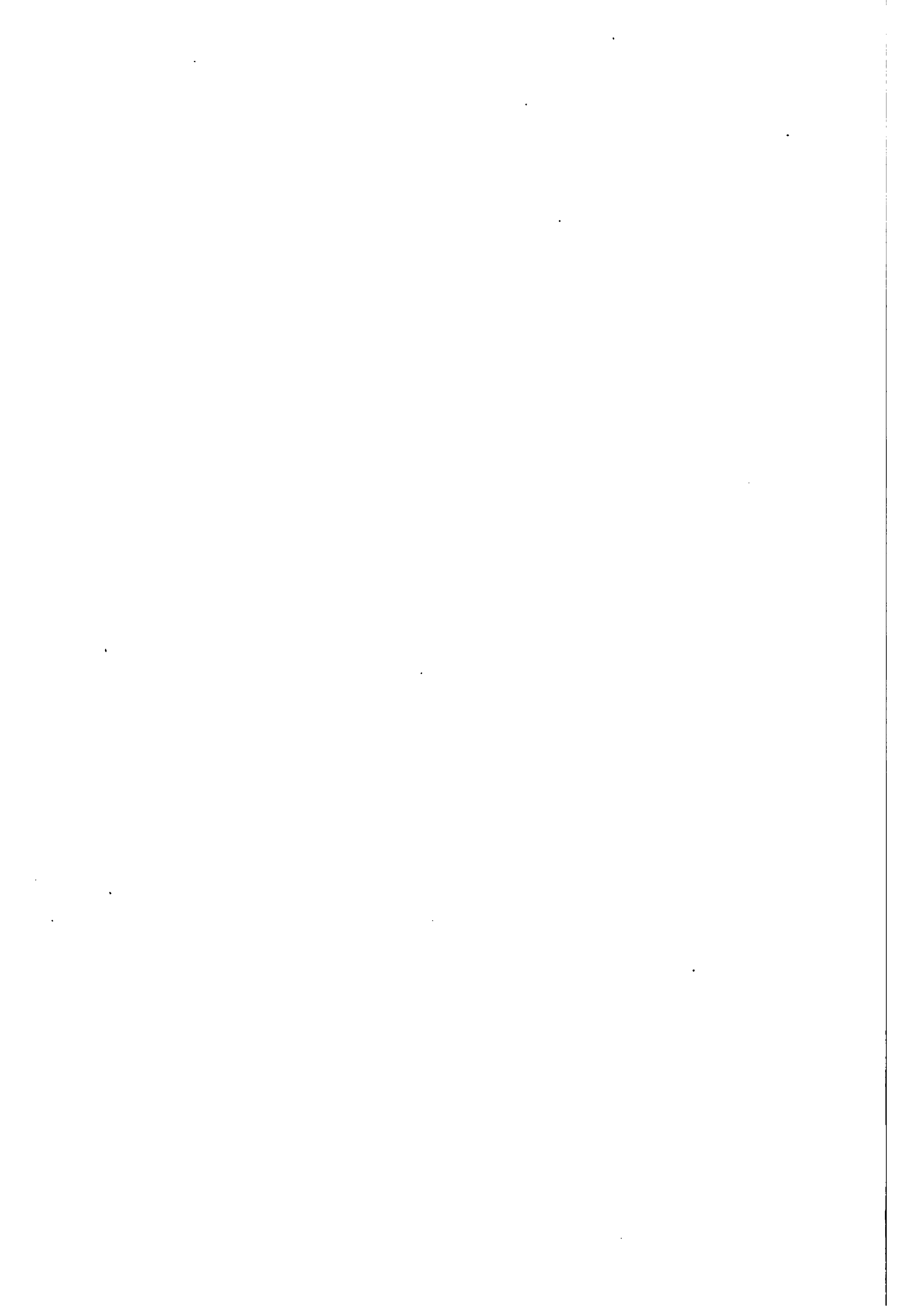
Dass alle angeführten Experimentalversuche mit den dazu erforderlichen Apparaten ausgeführt werden konnten, wurde zum grössten Theile nur durch das Wohlwollen von Freunden unserer Anstalt ermöglicht, wodurch das Conservatorium allmälig in den Besitz einer Sammlung von Lehrmitteln für Akustik und Orgelbau gelangte, wie sie manchem physikalischen Cabinete nicht zur Verfügung stehen dürfte. In dieser Richtung gebührt besonderer Dank den Herren Professoren an der Wiener Universität Dr. Gruber und Dr. Schenk, dem k. k. Hof-Clavierfabrikanten Bösendorfer, dem Clavierfabrikanten Berger, den Orgelfabriken Brauner in Mährisch-Neustadt, Kaufmann und Kotykiewitz in Wien, Ladegast in Weissenfels, Rieger in Jägerndorf, Welté in Freiburg, der Elektrotechnischen Fabrik B. Egger, Rudolf Hamel, Ingenieur und Baumeister[1]), dem Hof-Mechaniker Wolters, dem Hof-Instrumentenmacher L. Ullmann, dem Instrumenten-Fabrikanten Lutz, welchem Danke auch hier wiederholt wärmsten Ausdruck zu geben, ich mich angenehm verpflichtet fühle.

---

[1]) Spender eines Terpodiums.

Wien, im Herbste 1891.

L. A. Zellner.



Inhalts-Verzeichniss.

ERSTER BAND.

I. ABTHEILUNG.

Die physikalische Entwickelung des Tonmateriales.

VORTRÄGE ÜBER AKUSTIK.

ERSTER BAND.



I. ABTHEILUNG.

DIE PHYSIKALISCHE ENTWICKELUNG DES TONMATERIALS.

---

1. Vortrag.

(Einleitung. — Bewegung und Kraft. — Die Pendelbewegung. — Schwerkraft. — Fliehkraft. — Schwingung. — Phase. — Schwingungszeit.)

Ich habe Sie, meine Freunde, eingeladen, einige Ihrer freien Stunden der Lehre vom Klange zu widmen, die Ihnen vorzutragen und durch Experimente zu erläutern ich beabsichtige. Diese Vorträge werden einen Theil Ihrer Zeit in Anspruch nehmen, und Sie sind demnach im vollen Rechte, zu fragen, ob der Gewinn, welchen Sie aus dieser Lehre für Ihr Kunststudium erwarten, dem daran gesetzten Zeitaufwande entspricht. Hierauf lässt sich in aller Kürze Folgendes antworten. Von dem praktischen Nutzen, welchen die Kenntniss der Klanglehre dem Musiker in vielen Punkten thatsächlich zu gewähren vermag, ganz absehend, gebe ich ohneweiters zu, dass Mozart und Beethoven wahrscheinlich keine schönere Musik hervorgebracht haben würden, auch wenn sie ebenso grosse Akustiker gewesen wären, als sie grosse Componisten waren. Sie werden also im Grossen und Ganzen ohne Zweifel ebenso Tüchtiges im Componiren, im Singen wie im Spiele von Instrumenten leisten können, mit und ohne Akustik.

Nichtsdestoweniger bin ich der Ansicht, dass heute, wo das Streben nach Wissen ein allgemeines ist, der Musiker nicht unterlassen sollte, vom Wesen des Stoffes seiner Kunst, dem Klange, eine tiefergehende Kenntniss zu erlangen, um nicht Erscheinungen,

die derselbe darbietet, fremd gegenüberzustehen, und die Gefahr der Beschämung zu laufen, von dem nächstbesten Laien darüber belehrt zu werden; wie ich denn überhaupt der Meinung bin, dass Alles, was wir mehr wissen, uns in jeder Hinsicht nur vom Nutzen sein kann.

Dass Sie die soeben ausgesprochenen Ansichten theilen, beweisen Sie durch Ihre Anwesenheit.

Indem ich Sie also freundlich begrüsse, wollen wir sofort daran gehen, das Gebiet zunächst im Allgemeinen zu überblicken, welches im Einzelnen zu durchforschen den Gegenstand unserer weiteren Unterhaltungen bilden wird.

Fassen wir Alles, was hörbar ist, unter dem Begriffe Schall zusammen, so werden wir die Akustik objectiv als die Lehre vom Schalle zu definiren haben. Subjectiv betrachtet, fällt demnach Alles in das Gebiet der Akustik, was wir mit dem Sinne des Gehörs wahrnehmen, unbeschadet dessen, dass wir hier mancher Erscheinung begegnen werden, die entweder ohne die Vermittlung des Gehörs zu unserem Bewusstsein gebracht werden kann, oder aber zu deren Wahrnehmung wir die Mithilfe des Auges als desjenigen Organes heranziehen müssen, das bestimmt ist, die Bewegungen der Aussenwelt zunächst zu verfolgen.

Da nun, um zu hören, Etwas vorhanden sein muss, was gehört werden kann, jedes Vorhandensein aber ein Entstehen voraussetzt, so wird die erste Frage der Schalllehre offenbar lauten müssen: Wie entsteht das, was wir hören? woran sich folgerichtig die weiteren Fragen reihen werden: Wie gelangt das hörbar Gewordene an unser Ohr? Welche Vorgänge finden beim Hören statt? und: Wie setzen sich durch das Ohr empfangene Eindrücke in unserer Seele in entsprechende Vorstellungen um?

Mit dieser Fragenreihe ist die rationelle Gliederung unseres Stoffes gegeben. Die Behandlung desselben wird mithin nach zwei Richtungen zu erfolgen haben, und zwar nach der physikalischen und der physiologisch-psychologischen.

In ersterer Richtung werden wir uns mit den Körpern, welche hörbare Impulse hervorbringen, mit den dabei waltenden Gesetzen, dann mit der Art der Erregung dieser Impulse und den dabei auf-

tretenden Erscheinungen zu befassen haben. Bei vielen dieser Erscheinungen, die gemeinhin so rasch erfolgen, dass das Ohr die einzelnen Impulse nicht zu trennen und das Auge sie nicht zu verfolgen vermag, werden Optik und Elektricität uns Mittel darbieten, sie in ihre Bestandtheile zu zerlegen, um dieselben bequem beobachten, zählen und messen zu können.

Und so setzt uns die physikalische Akustik in die Lage, die Gründe zu erkennen, auf welchen die innere Beschaffenheit der verschiedensten Klänge einer und derselben Tonhöhe beruht, sie gibt uns die Mittel an die Hand, nachzuweisen, auf welche Art der Schall von seiner Quelle bis zu unserem Ohre gelangt, ob und welche Modificationen er auf diesem Wege erfährt und welche Zeit er braucht, um diesen Weg zu durchlaufen.

Sobald es sich aber weiter darum handeln wird, an irgend eine Erscheinung ein bestimmtes Mass anzulegen, zumal dann, wenn wir sie mit einer anderen numerisch vergleichen wollen, werden wir nicht umhin können, zur Zahl zu greifen.

Wir werden rechnen müssen und gelangen damit auf das Gebiet der mathematischen Akustik. Hier werden wir die Verhältnisse der Töne nach ihrer Höhe und Tiefe, sowie diejenigen zu ermitteln haben, die sich bei der Bildung von Tonschritten wie bei der Messung ihrer Abstände ergeben; wir werden aus Zahlen die Gesetze erkennen, nach welchen Töne zu wohlklingenden Gruppen zusammentreten oder als Missklänge empfunden werden müssen.

Zahlen werden die Gesetzmässigkeit nachweisen, mit welcher die verschiedenen Tonsysteme sich entwickelten, zugleich aber werden sie die Nothwendigkeit und Zweckmässigkeit der Abänderungen begründen, welche die Vereinbarkeit dieser Systeme mit der fortschreitenden Ausbildung der Tonkunst erheischte.

In physiologischer Beziehung wird es sich wesentlich um die Functionen jenes Organes handeln, welches berufen ist, das Hörbare aufzunehmen und zum Bewusstsein zu bringen. Je nachdem die Betrachtung sich mehr der einen oder der anderen dieser Functionen zuwendet, wird man sich auf das Gebiet der Physiologie oder auf jenes der Psychologie begeben.

Da es aber überhaupt unmöglich ist, die Punkte festzusetzen, wo die einzelnen Zweige der Naturwissenschaften über- und ineinander greifen, so wird die Psychologie der Tonempfindung auf das Gebiet

der Aesthetik hinüberleiten, andererseits die mathematische Klanglehre in die auf specifisch künstlerischer Grundlage beruhende, weil in letzter Auflösung von Kunstgebilden abgeleitete Tonsatzlehre hinübergreifen.

Diese Gebiete erfahren jedoch an unserer Anstalt in den Schulen für Harmonie- und Compositionslehre wie in den Vorträgen über Geschichte und Aesthetik der Musik eine so eingehende Pflege, dass es genügt, sie hier lediglich angedeutet zu haben.

Was aber den vorerwähnten mathematischen Theil unserer Untersuchungen betrifft, so möge Ihnen das Wort »Mathematik« keine unnöthigen Besorgnisse einflössen. Wir werden keiner algebraischen Formeln und Gleichungen bedürfen, sondern in allen Fällen, wo wir Ziffern heranzuziehen bemüssigt sind, mit den Jedermann geläufigen sogenannten vier Species das Auskommen finden. Und wenn von dem Quadrate einer Zahl die Rede sein wird, so wissen Sie ja ohne Zweifel, dass man das Product einer mit sich selbst multiplicirten Zahl das Quadrat dieser Zahl und diese letztere die Wurzelzahl nennt. Es ist sonach 4 das Quadrat von 2, 9 jenes von 3, 16 jenes von 4 u. s. w. und folglich 2 die Quadratwurzel aus 4, 3 die Quadratwurzel aus 9, 4 jene aus 16, $5 = \sqrt{25}$ u. s. w.

Und nun zur Sache selbst.

Es wird Sie vielleicht befremden, wenn ein Akustiker, statt Ohr und Aug' seiner Zuhörer in Anspruch zu nehmen, sich zunächst an deren Vorstellungskraft wendet. — Ich muss nämlich an Sie die Zumuthung stellen, sich an einen Ort und in einen Zustand versetzt zu denken, welchen Ort Ihnen zu bezeichnen ich allerdings ausser Stand bin, und welchen Zustand Sie selbst sofort als einen unmöglichen bezeichnen werden.

Der Ort müsste nämlich die Beschaffenheit absoluter Finsterniss, absoluter Stille und absoluter Temperaturlosigkeit haben, Bedingungen, die in Bezug auf den zweiten und dritten Punkt an keiner Stelle unseres Erdkörpers, weder auf ihm noch in seines Schosses Tiefen vorhanden sind.

An einen solchen Ort denken Sie sich in einem Zustande versetzt, in welchem alle selbstthätigen physischen Functionen Ihres Körpers, mithin auch Herz- und Pulsschlag völlig stillstehen, während jene der Wahrnehmung, nämlich Ihre Sinne, Ihnen in vollster Schärfe

geblieben sind. Sie würden sehen, wenn etwas Sichtbares — hören, wenn etwas Hörbares vorhanden wäre. Wärme- oder Kältegefühle würden sich Ihnen offenbaren, wenn der vorerwähnte temperaturlose Zustand eine Veränderung erführe.

In diesem Orte nun befinden Sie sich vollständig bewegungslos. Es regt sich nichts ausserhalb Ihrer, nichts in Ihnen. Keiner Ihrer Sinne vermag trotz angespanntester Aufmerksamkeit das Geringste wahrzunehmen.

Plötzlich glauben Sie, wie von weiter Ferne her, ein äusserst leises, tiefes Summen zu hören, welches näher und näher zu kommen, an Stärke und Bestimmtheit zuzunehmen scheint. Allmälig erkennen Sie das Gehörte als Klang, den Sie immer deutlicher zu unterscheiden vermögen. Derselbe durchläuft der Reihe nach höher und höher werdende Töne, die zunehmend bestimmbarer, begrenzter, wohlklingender werden. Diese Zunahme an Höhe, Intensität und Schärfe erfolgt nun immer rascher, es wird bald schwer, ihrer Steigerung zu folgen, die Höhe wird immer weniger unterscheidbar, endlich erregen die Töne, die sich in ein scharfes, schwirrendes Zischen verlieren, in Ihnen schmerzhafte Empfindungen. Und jetzt — ist es plötzlich wieder stille geworden, Sie hören nichts mehr. Nach einer Weile aber stellt sich ein neues Gefühl mit gleicher Allmäligkeit wie früher beim Klange ein: das Gefühl der Wärme. Diese nimmt ebenfalls an Intensität zu, und mit deren Zunahme stellt sich — abermals nach einer Weile — eine neue Wahrnehmung ein, denn jetzt glauben Sie auch — zu sehen. Ein anfangs kaum zu unterscheidendes tiefdunkles Roth ist es, das sich von der bisherigen absoluten Finsterniss gleichsam abscheidet. Das Roth nimmt immer hellere Färbungen an, es durchläuft alle Farben des Spectrums — plötzlich durchfluthet blendendes Licht den Raum!

Dieser ganze wunderbare Process, den Sie soeben in der Phantasie durchgemacht haben, er ist die Wirkung einer und derselben Ursache, er ist das Ergebniss der Bewegung, einer Bewegung, die, um Schall zu erzeugen, zwischen 32- und 80.000 Pulse, um Wärme hervorzubringen, 65 Billionen, endlich, um Licht zu geben, zwischen 400 und 800 Billionen Pulse in einer Secunde vollführen muss! Da es nun aber nicht wahrscheinlich ist, dass die Bewegungen, die zwischen der höchsten Ton- und der Wärmegrenze, dann zwischen dieser und der tiefsten Lichtgrenze liegen, keinerlei

physische Wirkungen hervorzurufen geeignet sein sollten, so werden wir uns fragen dürfen, ob diese Bewegungen nicht vielleicht dem Geruche, dem Geschmacke, der Elektricität, dem Magnetismus zukommen, oder vielleicht Erscheinungen geben, für deren Erkenntniss uns die entsprechenden Sinne überhaupt fehlen? —

Wenn man Alles, was ist, auf Grund ewiger Naturgesetze entstanden und fortbestehend annimmt, so lässt sich Nichts denken, was wichtiger, allumfassender wäre, als dasjenige, was wir Bewegung nennen; denn Bewegung, die das Uranfängliche sein musste, um einen Werdeprocess einzuleiten, ist nothwendig als das die Weltordnung bildende und erhaltende oberste Princip anzusehen.

Schauen wir wohin wir wollen, lassen wir unsern Blick, und wenn dieser nicht mehr reicht, unsere Vorstellungskraft hinschweifen bis in die entferntesten Weltenräume — Alles, was wir mit unseren Sinnen wahrzunehmen, mit unserer Phantasie uns darzustellen im Stande sind, beruht auf Bewegung, wie unser Schauen und unser Denken selbst nichts anderes ist als Bewegung. Ohne Bewegung würde nichts bestehen und nichts zur Erscheinung gelangen können. Alles Werden und Vergehen in der organischen und anorganischen Natur beruht ebenso auf Bewegung, wie die früher erwähnten Erscheinungen von Schall, Wärme, Licht, Geruch, Geschmack, wie deren Erfassen und Unterscheiden durch die Sinne, endlich wie deren Erkenntniss durch den Intellekt.

Aber die Bewegung, die alle diese Wirkungen hervorruft, ist doch wieder nur die Aeusserung einer noch höheren Potenz, ohne welche es keine Bewegung geben würde. Es ist dies die Kraft, die eine jede Bewegung zur Voraussetzung haben muss. Die Mannigfaltigkeit der Kraftäusserung ist eine ebenso unendliche, wie es die der Bewegungen ist. Was die Atome zu Substanzen zahlloser Art ordnet, was die Molecüle aneinander bindet und was ihren Zusammenhang trennt, ist Kraft. Kraft ist, was die Erde in ihrer Bahn um die Sonne, den Mond in seiner Entfernung von der Erde erhält. Kraft ist, was jeden Körper zum Mittelpunkte der Erde zieht, was der Magnetnadel ihre unveränderliche Richtung vorzeichnet, was den Dampf das stärkste Gefäss sprengen macht, was luftleer gemachte Glocken aneinander hält. Kraft ist, was die Natur im Sommer erblühen, im Winter erstarren lässt, was Berge abnagt und ins Meer führt, was das Meer abdampft und die Dämpfe zu Wolken sich

erheben macht, und ebenso ist Kraft, wodurch unsere Muskeln es vermögen, unseren Willen in Bewegungen umzusetzen.

Allein, erkennen wir auch das Walten der Kraft an ihrer Aeusserung allüberall, sie selbst ist uns ihrem inneren Wesen nach doch völlig unbekannt.

Von den unendlich verschiedenen Bewegungen, die wir beobachten — ich erinnere beispielsweise nur an die vielgestaltigen Kreisbahnen der Gestirne, an die Capillarität, an den Lauf der Gewässer, an die Strömungen des Windes, an die Dehnungen und Zusammenziehungen der Körper durch Temperaturänderungen u. s. w. — haben wir es in der Akustik hauptsächlich mit einer Art Bewegung zu thun, die man Oscillation, Vibration, Schwingung nennt, einer Bewegung, die, wenn sie sich auch unter Umständen unermesslich weit fortpflanzt (wie z. B. das Licht der Nebelflecken, das Tausende von Jahren braucht, um zu uns zu gelangen, trotzdem es in der Secunde 42.000 geographische Meilen (= 305.000 Kilometer) durchläuft), ihrem Wesen nach doch stets ein innerhalb mehr oder weniger enger Grenzen sich gleichmässig wiederholendes Hin- und Hergehen bildet. Das einfachste und instructivste Mittel, das Wesen der Vibrationsbewegung zu erkennen, besitzen wir im Pendel, das wir einer eingehenden Betrachtung unterziehen müssen, weil alle die scheinbar verschiedenartigsten Bewegungen, die wir als schallbildend erkennen werden, sich auf die Pendelbewegung zurückführen lassen. Es wird daher nothwendig sein die Gesetze der Pendelbewegung genau kennen zu lernen.

In dem gesammten Bereiche physikalischer Disciplinen gibt es — wenn wir von dem Hebel und der Walze absehen — vielleicht kein einfacheres, unscheinbareres Werkzeug, als das Pendel.

Ein Faden, woran eine Kugel hängt — das ist Alles.

Aber so einfach und unscheinbar dieses Werkzeug ist, so verdankt ihm das praktische Leben wie die höhere Wissenschaft doch Resultate, die zu den wichtigsten gehören, die man kennt. Ohne das Pendel würden wir nicht im Stande sein, eine senkrechte Linie zu bestimmen. Viele Handwerke, wie das des Maurers, des Zimmermanns, liessen sich ohne Loth (Senkblei) und Schrotwage (Fig. 1) nicht ausüben; und der Geometer kann es ebensowenig wie der Bergmann entbehren.

Ohne das Pendel würden wir aber auch kein Zeitmass haben und zahlreiche wissenschaftliche Bestimmungen nicht ausführen können. So lang man kein anderes Mittel zur Zeitbestimmung kannte als die Sonnenuhr (Gnomon), die eben nur zeigte, wenn es unserem Centralkörper gefällig war, zu scheinen, war eine Entwicklung exacter Kenntnisse nicht möglich.

Ohne ein solches, jederzeit vorhandenes Mass wären aber auch im praktischen Leben Einrichtungen, die wir heute ob ihrer Wichtigkeit nimmer entbehren könnten, wie z. B. der Post- und Eisenbahnverkehr, undenkbar. — Und verdankt nicht die Wissenschaft dem Pendel die Lösung der grössten Probleme und die unanfechtbarsten Beweise ihrer Richtigkeit? Es lehrt uns die Schnelligkeit des Lichtes und dadurch die denkbarst grössten Entfernungen messen; es beweist die Anziehung kleinerer Massen durch grössere und setzt uns in den Stand, das Gewicht der Erde und anderer Himmelskörper zu bestimmen[1]; es liefert den Beweis für die Schwerkraft (Gravitation) und die Fliehkraft (Centrifugalkraft)[2], wie für die Abplattung der Erde an den Polen[3] und liefert durch den »Faucoult'schen Versuch« den Nachweis der Drehung der Erde[4].

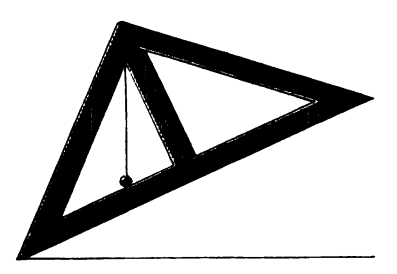


Fig. 1.

[1]) Cavendish bewies die Anziehung geringerer Massen durch grössere mittelst der astatischen Drehwage und bestimmte daraus die Dichtigkeit der Erde, verglichen mit der des Wassers, wie 5·5 zu 1. Wiederholte Versuche von Reich und Baily ergaben nahezu dieselben Resultate (zwischen 5·5 und 5·7). Auch Airy, der seine Berechnung aus dem Gangunterschiede zwischen einem auf der Erdoberfläche und einem in grosser Tiefe aufgestellten Pendel ableitete, gelangte zu ähnlichen Ergebnissen. Das Gewicht der Erde berechnet sich darnach auf rund sechs Quatrillionen Kilogramme.

[2]) Der Astronom Richer (1672) musste in Cayenne (5^0 n. B.) das Pendel seiner aus Paris mitgebrachten astronomischen Uhr um 1·25 Par. Linien verkürzen, um den Einfluss der, durch die, von den Polen gegen den Aequator fortschreitende Zunahme der Beschleunigung der Centrifugalkraft, verminderten Schwer-(Zug-)kraft auszugleichen. Daraus resultirt, dass die Schwere unterm Aequator um $^1/_{289}$ geringer ist als an den Polen.

[3]) Diese beträgt $^1/_{292}$ als Differenz zwischen der Länge der Erdachse und der des Aequatorial-Durchmessers.

[4]) Léon Faucoult (1851) fand, dass, wenn ein Pendel in der Ebene des Meridians schwingt, diese Ebene am Pole scheinbar von Ost nach West,

Kehren wir aber jetzt aus diesen hohen wissenschaftlichen Regionen wieder zu unserem Pendel zurück und betrachten wir es zunächst im Zustande seiner Ruhe.

Die Kraft, welche die Kugel des Pendels in ihrer zum Mittelpunkte der Erde gerichteten Lage erhält, ist die Schwerkraft oder Zugkraft. Bringen wir die Kugel aus ihrer Gleichgewichtslage (Ruhelage), so wird die Kraft sofort bestrebt sein, die Kugel wieder in die ursprüngliche Lage zu ziehen. Weil nun diese Kraft auf die Kugel jederzeit und in jeder Stellung, in der sie sich befindet, gleich einwirkt, so ist diese Kraft eine continuirliche und zugleich constante.

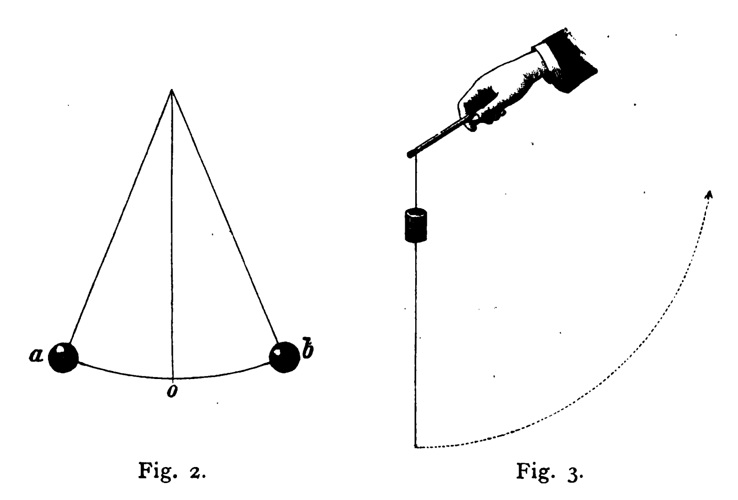


Fig. 2. Fig. 3.

Aber die Bewegung der Kugel selbst ist keine gleichförmige, sondern eine abwechselnd verzögerte oder beschleunigte, je nachdem sie von der Ruhelage weg oder auf sie hingerichtet ist.

Diese Ungleichmässigkeit der Bewegung hat darin ihren Grund, dass der Zug, den die Schwerkraft auf jeden Punkt der Bahn des Pendels ausübt, sich summirt. Dadurch erlangt das abwärts schwingende Pendel, im Punkte *o* (Fig. 2) angelangt, seine grösste Geschwindigkeit; im Aufschwingen zu *a* oder *b* verlangsamt sich, in Folge der Summirung des Zuges nach abwärts, seine Bewegung immer mehr,

---

und zwar stündlich um 15° des Quadranten rückt und demnach den Kreis in 24 Stunden vollendet. In Wien (48·125° n. B.) beträgt die Drehung 271°, am Aequator ist sie gleich o. — Ein solches an der »Laterne« der Rotunde befestigtes Pendel fungirte während der Wiener Weltausstellung 1873.

bis es, bei *a* oder *b* angekommen, wo die Fliehkraft, die das Bestreben hat, Alles von sich fortzuschleudern [1]), im Kampfe mit der Schwerkraft, die im Gegentheile Alles an sich zieht, unterliegt, einen unmessbaren Augenblick zum Stillstand gelangend, durch die siegreiche Schwerkraft zur Rückkehr und immer beschleunigteren Bewegung gegen die Ruhelage hin gezwungen wird. Was die gegen die Ruhelage zurückschwingende Kugel über diese Lage noch hinaustreibt, ist die allen Körpern innewohnende Trägheit, das sogenannte Beharrungsvermögen, welches darin besteht, dass jeder der Schwere unterliegende Körper in dem Zustande (sei es Ruhe oder Bewegung), in dem er sich eben befindet, insolang verharrt, bis nicht die Einwirkung einer ausser ihm liegenden, überwiegenden Kraft ihn zum Verlassen dieses Zustandes zwingt.

Solche Aenderungen werden im ersten Falle bewirkt durch Verschiebung des Gleichgewichtspunktes, im letzteren durch die Schwerkraft, dann durch Luft- und Reibungswiderstände.

Würde die Schwer- oder Zugkraft keine continuirliche sein, sondern in dem Augenblicke, wo die abschwingende Kugel ihre grösste Geschwindigkeit erlangt hat, zu wirken aufhören, so würde die Kugel, ihrer durch nichts gehinderten und nun allein wirkenden Fliehkraft folgend, um ihren Aufhängungspunkt unaufhörlich im Kreise schwingen. Dies würde aber auch nur in der Voraussetzung der Fall sein können, dass keine Luft vorhanden wäre, die Widerstand übt [2]), dass der Faden absolut kein Gewicht hat und am Aufhängungs-(Schwingungs-)punkte keine Reibung stattfindet. Da in Wirklichkeit keine dieser Bedingungen zu erfüllen möglich ist, so wird das Pendel, selbst wenn es in Folge eines heftigen Ausschleuderns ein- oder mehrmals im Kreise umherfliegt, dennoch dauernd keinen Kreis beschreiben, sondern vielmehr seine Schwingungen immer mehr verkleinern und endlich zur Ruhe kommen.

---

[1]) Zur Veranschaulichung der Wirkung der Fliehkraft kann folgender Versuch dienen. — Schwingt man einen durch ein grösseres Korkstück gezogenen Draht allmälig schneller im Kreise, so wird der mittelst Reibung festgehaltene, anfangs bei *a* (Fig. 3) befindliche Kork immer weiter gegen *b* rücken, und würde ohne die Hemmung am Drahtende, gleich einem Steine aus einer Schleuder, fortfliegen.

[2]) Aus der stets unveränderten Bewegung der Gestirne ziehen wir daher den Schluss, dass es in jenen Regionen keine Luft im Sinne unserer Atmosphäre geben kann.

Die Grenzen, bis zu welchen die Kugel aufschwingt, nennt man die Elongations- (oder Ausschlags-, Schwingungs-, Excursions-, Vibrations-, Oscillations-)grenzen; die Entfernung der Elongationsgrenzen von der Ruhelage die Amplitude (Weite — Breite) der Schwingung. Je weiter sich der Punkt der Umkehr von der Ruhelage befindet, um so grösser ist die Amplitude.

Wenn der Ausschlagswinkel der Amplitude 6 Grade des Kreisbogens[1]), d. i. $= {}^{1}/_{15}$ des Quadranten (${}^{1}/_{4}$-Kreises) (Fig. 4) nicht überschreitet, so sind die Schwingungen, mögen sie so klein werden als sie wollen, innerhalb dieser Grenze als von nahezu vollständig gleicher Zeitdauer, mithin als isochron, d. h. zeitgleich anzusehen, indem die Differenz von 1^0: 1.0007 [2]) in der praktischen Akustik für alle Fälle vernachlässigt werden kann, da auch die grössten Amplituden tönender Körper diesen Winkel nicht überschreiten, ja selten erreichen.

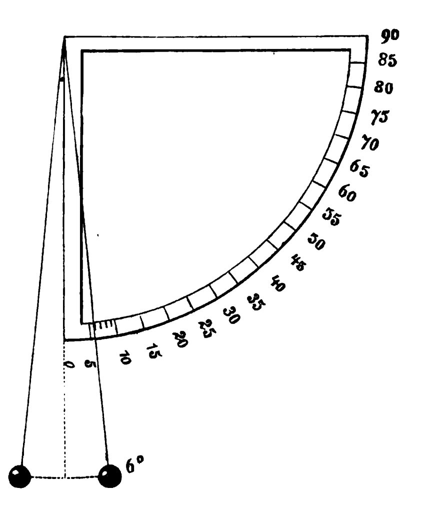


Fig. 4.

In Folge ihrer gleichen Zeitdauer wird die Pendelbewegung zu einer sogenannten periodischen, nämlich in genau gleicher Zeit sich wiederholenden.

Bei einer Periode frägt man nach der Zeitdauer derselben. Man versteht darunter die messbare Zeit, die von einem bestimmten Grenzpunkte der Bewegung bis zu dem anderen verfliesst. Da die Pendelbewegungen isochron sind, so ist es gleichgiltig, welchen Punkt der Schwingungsbahn man zur Beobachtung wählt.

Am leichtesten wahrzunehmen sind die Punkte des momentanen Stillstandes, die Oscillationsgrenzen. Ebenso kann auch der Durch-

---

[1]) Der Kreis wird getheilt in $360^0 = 21.600$ Min. $= 1,296.000$ Sec.

[2]) Bei 6^0 ist die Schwingungsdauer um ${}^{7}/_{10000}$ grösser gegenüber jener von 1^0 Ausschlag, d. h.: ein auf 1^0 Winkelausschlag regulirtes Secundenpendel würde bei 6^0 nach 10.000 Secunden $= 2^h 47'$, um 7 Secunden oder um $2^1/_2$ Secunden in einer Stunde zurückgeblieben sein.

gang durch die Ruhelage zur Zählung der Schwingungen benützt werden.[1])

Wenn das Pendel den Weg von einer Elongationsgrenze zur anderen, oder von einem Durchgange durch die Senkrechte bis zum nächsten, zurückgelegt hat, hat es eine Schwingung gemacht.

Ich muss hier bemerken, dass über den Begriff einer Schwingung unter den Physikern keine übereinstimmende Ansicht besteht. Neuerer Zeit bezeichnen die Deutschen einen Hin- **und** Rückgang, die Franzosen einen Hin- **oder** Rückgang als eine Schwingung.[2])

Es ist hier nicht der Ort, die Gründe zu erörtern, welche für die grössere Zweckmässigkeit der einen oder der anderen Zählweise sprechen. Wir wollen unter Schwingung einen Hin- oder Hergang des Pendels verstehen und in Fällen, wo zur Erklärung gewisser Erscheinungen, beispielsweise der sogenannten Phasen, ein Hin- **und** Hergang erfordert wird, dies als eine Doppelschwingung bezeichnen.

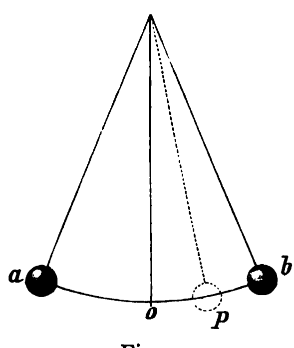


Fig. 5.

Unter Phase versteht man die Wiederkehr eines und desselben Vorganges. In unserem Falle sind die Elongationspunkte oder die Durchgänge durch die Ruhelage Phasen, und zwar solche, die in jedem Hin- oder Hergange des Pendels vollständig zur Erscheinung gelangen.

Anders ist es, wenn man die Phase an einem sonstigen, beliebigen Punkte der Bahn setzt, z. B. bei *p* (Fig. 5). — Damit die Kugel diesen Punkt in gleichen Zeitabständen passirt, muss sie von *p* nach *a*, von da nach *b* zurückschwingen und von hier wieder den Punkt *p* erreichen, weil im anderen Falle, wenn von dem Punkt *p* nur bis *a* und von da zurück nur bis *p* gezählt würde, die Strecke *pb*

---

[1]) Letzteres geschieht hauptsächlich bei den elektrischen Regulatoren. Die Platinspitze am Ende der Pendelstange taucht bei jedem Durchgange durch die Senkrechte in eine Quecksilberkuppe, wodurch der Stromschluss erfolgt, der zu Glockensignalen, Ein- und Ausschaltungen, und sonstigen Bewegungen mittelst Ankeranziehung benützt werden kann. Später hierüber Näheres.

[2]) Frühere deutsche Akustiker, wie Chladny, Scheibler, Wilh. Weber (Poggendorf 14, S. 398), zählten nach einfachen, der Franzose Sauveur nach Doppelschwingungen.

und zurück ungezählt bliebe. Wir können uns davon praktisch sofort überzeugen, wenn wir beispielsweise das Quecksilbergefäss *a* an unserem mit Glockenschlag versehenen elektrischen Pendel (Fig. 6) nach links (*b*) oder rechts (*c*) verschieben. Um jetzt isochrome Zeitmarken zu erhalten, dürfen wir nur jeden zweiten Glockenschlag, mithin nur nach Doppelschwingungen zählen, deren jede nun selbstverständlich einer Dauer von zwei Secunden entspricht.

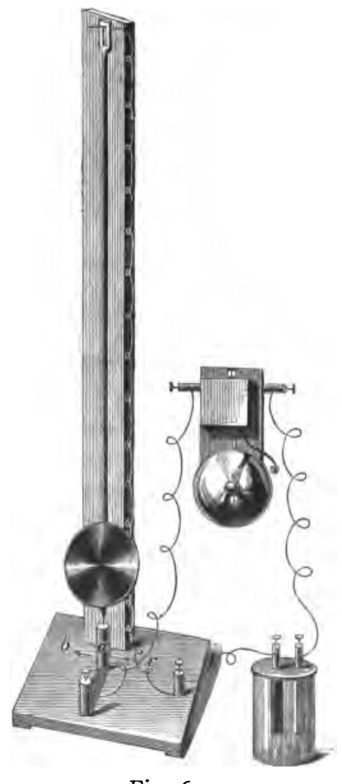


Fig. 6.

Um die Dauer einer periodischen Bewegung bestimmen zu können, müssen wir das Mass kennen, nach welchem wir die Bestimmung auszuführen haben. Als dieses Mass wird in der Akustik ebenso wie in den übrigen physikalischen Disciplinen die Secunde angewendet, eine Zeitstrecke, welche durch eine Schwingung eines Pendels abgegrenzt wird, dessen Fadenlänge in unserer geographischen Breite nämlich 48^0 125^m nördlich, nahezu 994 Millimeter (genau 0·993.847) beträgt, und das wir, der leichteren Rechnung wegen, mit rund 1000 Millimeter oder 1 Meter annehmen wollen.

Die Zeitgrösse einer Secunde ist zwar sehr klein, denn in einer Stunde kommt sie 3600 mal, im Tage 86.400 mal vor[1]), aber die Dauer einer Secunde ist sehr gross gegenüber den gar kleinen Zeitgrössen einer Schwingung eines tönenden Körpers (von den milliardenmal schnelleren Schwingungen der Lichtwellen zu geschweigen), wenn wir uns erinnern, dass die höchsten vernehmbaren Töne an die 80.000 Schwingungen in einer Secunde vollführen, eine solche Schwingung also die Dauer von $^1/_{80000}$ einer Secunde hat.

---

[1]) Auf gewöhnlichen Chronographen (sogenannten Rennuhren) wird sie in 5 Theile untertheilt und es geht demnach der Zeiger in einem Tage an 432.000 solchen Theilen vorüber.

Fragen wir nun, wovon die sogenannte Schwingungszeit, d. h. die Dauer einer Schwingung des Pendels abhängt, so wird ein einfaches Experiment uns belehren, dass es die Länge des Fadens, die sogenannte Pendellänge ist, welche diese Dauer bestimmt. Wir brauchen nämlich blos die drei Pendel (Fig. 7) in Bewegung zu setzen, um sofort zu erkennen, dass ein Pendel, je kürzer er ist, um so schneller schwingt.

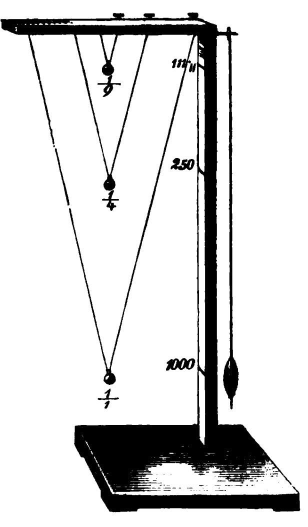


Fig. 7:

Ein ebenso einfaches Experiment wird uns weiters zeigen, dass ein Pendel, welches statt einer, zwei, drei Schwingungen in der Secunde machen soll, nicht zwei- und drei-, sondern vier- und neunmal kürzer als ein Meter sein muss, oder dass ein viermal so langes Pendel zu einer Schwingung zwei, ein neunmal so langes Pendel drei Secunden braucht.

Hieraus ergibt sich das wichtige Gesetz, »dass, wenn die Schwingungszeiten wie die natürlichen Zahlen wachsen oder abnehmen, die Pendellängen wie die Quadrate dieser Zahlen wachsen oder abnehmen müssen«. Dem gleichen Gesetze unterliegen die Intensitäten des Schalles wie die des Lichtes; sie nehmen zu oder ab im quadratischen Verhältnisse ihrer Abstände.

Die Schwingungserscheinungen weiter zu verfolgen wird den Gegenstand des nächsten Vortrages bilden.

---

2. Vortrag.

(Schwingungszahl. — Schwingungsdauer. — Molecular- und fernwirkende Kraft. — Die Wellenbewegung.)

Wir erkannten, dass die Schwingungszeit eines Pendels in einem bestimmten, und zwar im quadratischen Verhältnisse zur Pendellänge steht, d. h., dass ein Pendel, welches z. B. zwei oder drei Schwingungen in der Secunde macht, viermal oder neunmal so kurz

sein muss als eines, welches in der Secunde nur einmal schwingt, oder, was dasselbe besagt: dass die Schwingungsdauer eines viermal so kurzen Pendels $^1/_2$ Secunde, oder jene eines neunmal so kurzen $^1/_3$ Secunde ist, während ein $^4/_4$ oder $^9/_9$ langes Pendel eine Schwingung in der Secunde vollführt. Damit Sie eine markante Vorstellung von diesem Verhältnisse bekommen, will ich erwähnen, dass beispielsweise ein Pendel, welches die Schwingungsdauer einer Minute haben soll, die Länge von 60 . 60 . 1000 *mm* = 3600 *m* bekommen müsste; bei einer Schwingungsdauer von $^1/_{10}$ Secunde müsste es dagegen eine Länge von $^1/_{10}$. $^1/_{10}$. 1000 *mm*, also von einem Centimeter erhalten.

In der Akustik kommt nun aber, da den Beobachtungen das stabile Einheitsmass einer Secunde S zu Grunde gelegt wird, die Pendellänge und damit die Schwingungsdauer nicht so direct, wie die Schwingungszahl in Betracht, um deren Bestimmung es sich vorzugsweise handelt, weil von ihr, wie wir später erkennen werden, die Tonhöhe abhängt.

Unter Schwingungszahl versteht man die Zahl n, welche angibt, wie viel Schwingungen ein Pendel, oder jeder andere pendelartig schwingende Körper, in der Zeiteinheit einer Secunde vollführt. Man begreift sofort, dass man diese Zahl erhält, wenn man die Secunde mit der Schwingungsdauer t dividirt. Hat also beispielsweise ein Pendel eine Schwingungsdauer gleich $^1/_2$ Secunde, so muss seine Schwingungszahl 2 sein, nämlich das Pendel macht 2 Schwingungen in der Secunde. Ist die Schwingungszahl gleich 2, so muss die Dauer einer Schwingung gleich $^1/_2$ sein oder mit anderen Worten: Ist die Dauer einer Schwingung $^1/_2$ Secunde, so werden in der Secunde 2 Schwingungen — ist die Dauer 2 Secunden, so wird in der Secunde $^1/_2$ Schwingung stattfinden.[1])

[1]) Die Rechnung wird ausgeführt wie folgt:

$$t = {}^1/_2, \text{ mithin } \frac{S}{{}^1/_2\, t} = 2\,n$$

$$n = 2, \text{ mithin } \frac{S}{2\,n} = {}^1/_2\, t$$

$$n = {}^1/_2, \text{ mithin } \frac{S}{{}^1/_2\, n} = 2\,t$$

$$t = 2, \text{ mithin } \frac{S}{2\,t} = {}^1/_2\, n$$

Es leuchtet ein, dass, je mehr Schwingungen wir hintereinander beobachten, wir um so genauer die Dauer der einzelnen Schwingung bestimmen können. Finden wir z. B., dass sich in 60 Secunden 47 Schwingungen vollziehen, so würden auf eine Secunde $^{783}/_{1000}$ Schwingungen entfallen und die Dauer einer Schwingung wird $1^{227}/_{1000}$ Secunde sein.[1] Bei Beobachtung nur einer Schwingung wäre ein so genaues Resultat in diesem Falle nicht zu erzielen, wo eine Schwingung nicht gleich einer Secunde ist, sondern weniger beträgt.

Es drängt sich noch die Frage auf, ob die Schwingungsdauer und Schwingungszahl, ausser von der Länge des Pendelfadens, nicht auch vom Gewichte oder von der Grösse der Kugel abhängt? Bei gleicher Grösse (Volumen) ist die Masse (das Eigengewicht) ganz ohne Einfluss, denn: ist die Masse beispielsweise zehnmal schwerer, so ist auch der Zug ein zehnmal stärkerer und die Bewegung wird in derselben Zeit vollführt werden.

Wir wollen uns hievon durch einige Versuche sogleich selbst überzeugen, indem wir zuerst eine mit Sand gefüllte Glaskugel, dann dieselbe Kugel ohne Sand, eine Holzkugel und eine Bleikugel und zwar alle von ganz gleicher Grösse, also Körper von sehr verschiedener specifischer Schwere benützen, und deren Schwingungen mit denen unseres Regulators (Fig. 7) vergleichen.

Was das Volumen der Kugel selbst betrifft, so wird es bei übermässiger Grösse allerdings eine Verlangsamung der Bewegung in Folge des Luftwiderstandes bewirken, weshalb auch alle Uhrenpendel linsenförmig gemacht werden, um der Luft keine Fläche darzubieten.

Den Einfluss des Elongationswinkels haben wir früher schon als einen fast zu vernachlässigenden Factor kennen gelernt, wenn derselbe 6^0 nicht überschreitet.

---

[1]) Hier die Rechnung:

$$\frac{n = 47}{t = 60} = 0{\cdot}783\, n,$$

$$\frac{t = 60}{n = 47} = 1{\cdot}277\, t.$$

Das Pendel, wiewohl seine einfachste Form als Fadenpendel, in der wir es bisher betrachteten, als die geeignetste sich erwies, die Gesetze seiner Functionen kennen zu lernen, wird in dieser Form weniger zu wissenschaftlichen Untersuchungen, als im praktischen Leben benützt, und zwar, wie schon erwähnt, hauptsächlich zur Ermittlung der verticalen wie der horizontalen Richtung als Loth und Schrottwage, welche letztere für feinere Bestimmungen durch die Wasserwage (Libelle) ersetzt wird. In der Musik kann man das Fadenpendel, als einen ausreichenden und überaus billigen Ersatz für das Metronom, zum Taktmessen, d. h. zum Angeben des Tempo, verwenden.

Hier sehen Sie das Object: ein mit Kugel und Theilung versehenes Band (Fig. 8). Die Zahlen auf letzterem zeigen, wie beim Metronom, an, wie viel Schwingungen das Pendel, an diesen Stellen gehalten, in der Minute vollführt.[1]) Zum Zwecke physikalischer Untersuchungen von längerer Dauer, wohin auch die akustischen gehören, eignet sich aber das Fadenpendel aus zwei Gründen nicht; einmal, weil es bald zur Ruhe gelangt, und dann, weil es seine Bewegungen nicht übertragen kann, um sie stetig zu erhalten und um sie zu registriren.

Nun ist aber jeder dem Einflusse der Schwere unterliegende Körper, der sich um einen Punkt frei drehen kann, wenn er aus der Gleichgewichtslage gebracht wird,

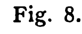


Fig. 8.

---

[1]) Zur Anfertigung eines solchen billigen und hinreichend genauen Taktmessers dient nachstehendes Verfahren. Vom Mittelpunkte der Kugel misst man 250 *mm* und bezeichnet diese Länge mit der Zahl 120. In gleicher Weise werden Längen von 287, 360, 562, 1000 und 1440 abgemessen und mit den Zahlen 112, 100, 80, 60 und 50 versehen. Wünscht man für andere Schwingungszahlen die Bandlängen zu ermitteln, so benützt man nachstehende Formel:

$$l = \frac{L s^2}{s_1^2},$$

wobei l die der gesuchten Schwingungszahl s entsprechende Bandlänge, s_1 die Schwingungszahl der ganzen Bandlänge L bedeutet. — Soll z. B. die Bandlänge für 72 Schwingungen per Minute gefunden werden, so wird die Rechnung lauten:

$$: 1000\,mm = 60^2 : 72^2, \text{ daher } l = \frac{1000 \,.\, 3600}{5184} = 694{\cdot}4\,mm.$$

geeignet, Pendelschwingungen zu vollführen, sobald sein Schwerpunkt tiefer liegt, als der Drehpunkt. Ein einfaches Beispiel liefert Ihnen der erstbeste frei aufgehängte Gegenstand, z. B. ein Regenschirm, ein Sessel, ein Hut. Versetzen wir ihn in Schwingung und wir erkennen sofort, dass diese Schwingungen periodische, dass es Pendelbewegungen sind.

Diese Scheibe, in ihrem Mittelpunkte *a* (Fig. 9) an einem wagrechten Stifte aufgehängt, wird eine drehende, aber keine periodische Bewegung gestatten, denn sie befindet sich in der Gleichgewichtslage; Dreh- und Ruhepunkt fallen zusammen. Sobald wir aber die

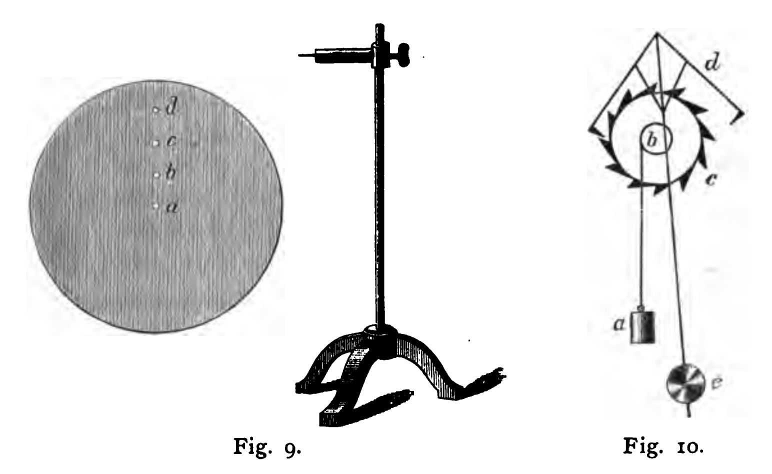


Fig. 9. Fig. 10.

Scheibe ausserhalb dieses Punktes, etwa bei *b*, *c* oder *d*, an den Stift hängen und in Bewegung setzen, sehen wir sie pendelartige Schwingungen vollführen.

Sie haben hier zugleich Gelegenheit, eine interessante Wahrnehmung zu machen. Je kürzer aufgehängt, um so rascher sollte die Scheibe schwingen. Wir erblicken aber hier das Gegentheil. Was sie bei kurzer Aufhängung langsamer, bei längerer schneller schwingen macht, ist das Gegengewicht des über dem Aufhängungs-(Dreh-)punkte befindlichen Theiles. Wie wir bald bemerken werden, beruht auf dieser Eigenthümlichkeit die Einrichtung des Metronoms.

Der Umstand nun, dass feste Körper ebenfalls periodische Schwingungen vollführen können, macht es möglich, einen continuirlichen Zeitmesser, die Pendeluhr, zu construiren, wo durch den Eingriff der starren Pendelstange in das Räderwerk der Gang

der Zeiger, durch den Antrieb des Gewichtes die Stetigkeit der Bewegung des Pendels, durch dieses aber wieder die Regelung der Schwingungsdauer bewirkt wird.

Das Zusammenwirken der für die Continuität des Ganges einer Pendeluhr absolut erforderlichen Theile will ich Ihnen im Kurzen erklären. Der Zug des Gewichtes *a* (Fig. 10) bewirkt die constante Drehung der sogenannten Aufzugwelle *b*, die als ein System zahlloser aufeinanderfolgender wagrechter Hebel angesehen werden muss. Die Kraftwirkung ist also stets die gleiche. Dieselbe überträgt sich auf das Steigrad *c*, dessen Zähne auf die schiefen Ebenen des um den Drehungspunkt *b* balancirenden sogenannten Ankers *d* antreibend wirken. Diese Antriebe erhalten das Pendel *e* durch die Stetigkeit der Impulse auf die Pendelstange in ununterbrochener Bewegung, weil diese Impulse mit den Schwingungen zusammenfallen, deren Tempo von der Pendellänge abhängt. Es sind dies verhältnissmässig schwache Anstösse, aber ihre gleichmässige Wiederholung steigert die Schwingungen zu ihrer vollen Amplitude und erhält diese constant.

Bei diesem Anlasse will ich nebenbei bemerken, dass durch die Summirung isochroner, mit der Schwingungsdauer zusammentreffender Impulse, mögen sie an sich verhältnissmässig noch so schwach sein, mächtige Wirkungen entstehen können. So kann beispielsweise ein Kind eine Schaukel mit mehreren Menschen, oder eine centnerschwere Glocke durch gleichmässige, im Tempo der Eigenschwingung stetig erfolgende Anstösse (oder Züge) zu den grössten Excursionen bringen. Aus gleichem Grunde vermeidet man, Truppen im Tempo über Hängebrücken marschiren zu lassen, um diese durch die aus der Summirung der isochronen Impulse resultirenden heftigen Schwingungen nicht zu gefährden.

Wollen Sie sich aber jetzt auch durch einen Versuch überzeugen, dass mittelst eines an der Welle der Pendelstange angebrachten Fadenpendels ein bewegender Eingriff in das Räderwerk nicht möglich ist. —

Wird eine Pendelstange über ihren Drehpunkt verlängert und mit einem verschiebbaren Gegengewichte versehen, so hat man ein bequemes Mittel, die Schwingungszeiten und damit die Schwingungszahlen beliebig abzuändern. Sie werden dies aus Versuchen mit

dieser Pendelstange (Fig. 11) sofort erkennen, die dieselben Resultate ergeben, wie zuvor die Scheibe.

Auf diesem Principe beruht die Construction des vom Wiener Hofmechaniker Mälzel (geb. 1772) im Jahre 1815 erfundenen, bezüglich seiner Anwendung Ihnen wohlbekannten Metronoms, welches die Minute in 50 bis 160 und mehr Theile zu theilen gestattet.[1]) —

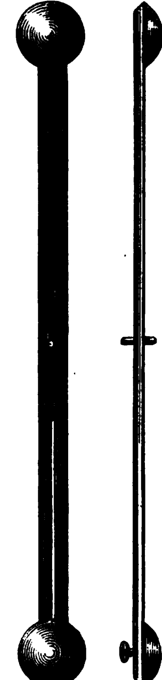
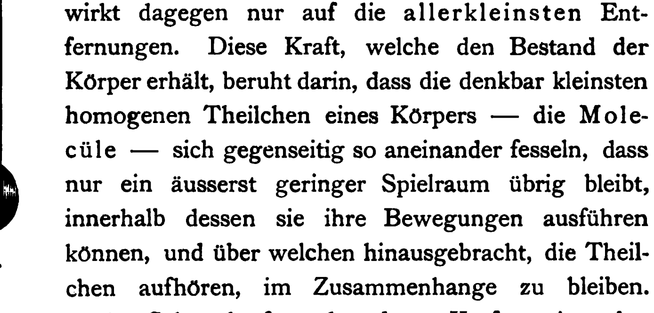



Fig. 11.

Ausser der Schwerkraft, auf der die bisher betrachteten Pendelbewegungen ausschliesslich beruhen, gibt es noch andere continuirlich wirkende Kräfte, von welchen Antriebe zu pendelartigen Bewegungen ausgehen können. Dahin gehören der Magnetismus der Erde und die Elektricität. Es sind dies sogenannte fernwirkende Kräfte. Von letzterer hat Ihnen das elektrische Pendel bereits eine Probe geliefert. Vom Magnetismus bietet die Richtkraft der Magnetnadel (Boussole) ein bekanntes Beispiel.

Eine andere Art Kraft, die Molecularkraft, wirkt dagegen nur auf die allerkleinsten Entfernungen. Diese Kraft, welche den Bestand der Körper erhält, beruht darin, dass die denkbar kleinsten homogenen Theilchen eines Körpers — die Molecüle — sich gegenseitig so aneinander fesseln, dass nur ein äusserst geringer Spielraum übrig bleibt, innerhalb dessen sie ihre Bewegungen ausführen können, und über welchen hinausgebracht, die Theilchen aufhören, im Zusammenhange zu bleiben. Diese Kraft vermag der Schwerkraft und anderen Kräften einen bedeutenden Widerstand entgegenzusetzen. Man denke sich beispielsweise einen vertical aufgehängten Eisenstab und unmittelbar unter seiner Aufhängestelle einen Querschnitt. Oberhalb und unterhalb des Querschnittes stossen zwei Molecülebenen zusammen. Jedes Molecül der oberen Ebene zieht das nächste Molecül der unteren Ebene an, und wenn wir uns vorstellen, dass die Schwere jedes einzelne Theil-

[1]) Die Bestandtheile und das Ineinandergreifen derselben werden an einem vom Gehäuse entblössten Metronom erklärt.

chen nach unten zieht und es vom oberen Nachbarn abzureissen strebt, so erkennen wir sofort, dass die gegenseitige Anziehung der Molecüle stärker sein muss als die gesammte Schwere des unter jenem Querschnitte hängenden Theiles des Stabes. Ja, wir werden die ungeheure Widerstandsfähigkeit dieser Cohäsionskraft erst völlig erkennen, wenn wir durch Anhängung von Gewichten der Schwerkraft zu Hilfe kommen, um die Trennung von Molecülebenen zu

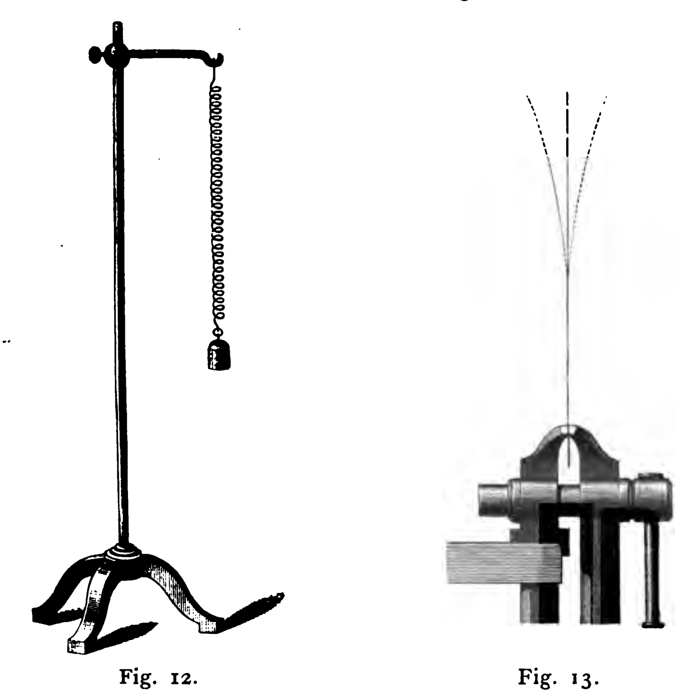


Fig. 12. Fig. 13.

bewirken, wozu, falls unser Eisenstab, beziehungsweise diese seine Ebene einen Querschnitt von 1 □Centimeter hat, ein Gewicht von circa 6100 Kg., d. i. von 122 Centnern erforderlich wäre.

Diese Kraft nun spielt in der Akustik eine grosse Rolle, indem sie es ist, welche eine Saite befähigt, einer Spannung bis zu einem bestimmten, oft überraschend hohen Grade Widerstand zu leisten; eine Kraft, welche bewirkt, dass eine gespannte Saite oder Spirale (Fig. 12), die wir in der Mitte ausbiegen, oder ein an einem Ende festgeklemmter Stab, den wir aus seiner Ruhelage zur Seite ziehen (Fig. 13), nicht nur zur Ruhelage zurückkehrt, sondern über diese

hinausschwingt und, gleich dem Pendel, constante und isochrone Bewegungen zwischen den Elongationsgrenzen ausführt.

Diese Kraftform, zu der auch der Widerstand gegen Zusammendrückbarkeit und gegen Drehung (Torsion) gehört, äussert sich, sobald die Gleichgewichtslage des betreffenden Körpers gestört wird, in dem Zurückschnellen der Saite, der Feder oder der Spirale, in dem Wechsel von Verdichtungen und Verdünnungen gestörter Luftschichten u. s. w. Man nennt diese Kraftform: Elasticität (Schnellkraft).

Als Einleitung in die nähere Betrachtung derselben wollen wir einen Versuch ausführen, der die verschiedenen Schwingungsarten, die ein elastischer Körper vollführen kann, sowohl einzeln wie gleichzeitig darzustellen gestattet.

Eine freihängende, mit einem Gewichte versehene Drahtspirale, wie Figur 12, wird schwingen können:

1. bei freihängendem Gewichte: wie ein Pendel;

2. bei festgehaltenem Gewichte: transversal wie eine Saite;

3. eine Drehung des (freihängenden) Gewichtes in der Horizontalebene erzeugt die Torsions- und

4. eine kleine Spannung des Gewichtes in verticaler Richtung, bevor es sich selbst überlassen wird: die Longitudinalschwingung und zugleich ein schematisches Bild des Wechsels von Verdichtung und Verdünnung und Dehnung und Zusammenziehung.

(Das Beisammensein aller dieser Schwingungsarten kann hier zur Erscheinung gebracht werden, wenn das Gewicht, nachdem es gedreht, herab- und bei Seite gezogen wurde, losgelassen und hierauf auf die Mitte der Spirale ein wagrechter Stoss geführt wird.)

Auf der Elasticität nun beruhen die Bewegungen aller Schallquellen, die, durch welches Mittel immer hervorgerufen, auf die Pendelbewegung zurückzuführen sind.

Die Beweise dafür wird uns die Wellenlehre liefern, welcher unsere folgenden Betrachtungen gewidmet sein werden. Zuvor aber wollen wir noch das über das Pendel Vorgetragene in ein Resumé zusammenfassen.

Aus den experimentellen Beobachtungen der Pendelbewegungen erkannten wir als deren wesentliche Momente: die Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Pendellänge, die Unabhängigkeit der

Schwingungszeit von der Schwingungsweite, und den Isochronismus der letzteren.

Hieraus nun lassen sich folgende wichtige Fundamentalsätze für die Akustik ableiten:

1. Es muss angenommen werden, dass jede pendelartige Bewegung eines elastischen Körpers einen tonbildenden Impuls erzeugt, weil erfahrungsgemäss solche Impulse, wenn sie sich hinreichend rasch wiederholen, einen Ton hervorbringen. Es kann demnach nur die Zahl dieser in einer bestimmten Zeiteinheit erfolgenden Impulse sein, welche die Tonhöhe bestimmt.

2. Die grössere Schwingungsweite muss nothwendig eine grössere Energie der Impulse zur Folge haben, nachdem der grössere Bogen in derselben Zeit durchlaufen wird, wie der kleinere. Da nun die Schwingungsweiten (Amplituden) isochron, also ohne Einfluss auf die Schwingungszahl, und sonach auch auf die Tonhöhe sind, so kann es nur die Amplitude sein, welche die Tonstärke bestimmt.

Aus diesen beiden Sätzen folgt also:

1. dass gleich hohe Töne, ob schwach oder stark, die gleiche Schwingungszahl haben;

2. dass die Grösse der Amplitude auf die Tonhöhe keinen Einfluss haben kann, weil die Amplituden isochron sind;

3. dass die Tonhöhe bei gleicher Schwingungszahl unverändert bleibt, mögen die Amplituden grösser oder kleiner sein;

4. dass die Tonstärke bei gleicher Amplitude unverändert bleibt, möge die Schwingungszahl grösser oder kleiner sein; — oder Alles in einen Satz zusammengefasst:

Dass die Tonhöhe von der Schwingungsweite, die Stärke von der Schwingungszahl unabhängig ist.

Selbstverständlich gilt dieses Gesetz nur innerhalb der dem Isochronismus gesteckten Grenzen, und bei gleicher Dichtigkeit des Mediums. —

Und nun zur Wellenlehre.

Wer von Ihnen am Gestade des Meeres oder auch nur eines grösseren Sees während einer leichten, landwärts ziehenden Brise dem Wellenspiel zugesehen, wird sich lebhaft erinnern, wie plötzlich weit draussen eine Wasserbarre sich erhob, um sich mit schaumbekränztem Kamme immer näher gegen uns her zu wälzen, — ein

förmlicher Wall aus brodelndem Wasser, oft viele Meter hoch. Der Wasserberg rauscht an uns heran, wir weichen unwillkürlich zurück, denn wir fürchten, von ihm überschüttet zu werden. Er gelangt ans Ufer und zerschellt. Aber schon folgt ihm ein zweiter, ein dritter und so geht es fort.

Eine ähnliche Erscheinung, jedoch anders gestaltet und verlaufend, vermögen wir hervorzurufen, wenn wir in einen ruhigen Teich oder in ein Bassin einen Stein werfen. Um den Punkt, wo er versinkt, bildet sich ein Kreis, ein erhabener Ring aus Wasser, der sich concentrisch immer weiter ausbreitet, schliesslich verschwindet oder aber, am Ufer angelangt, zurückkehrt.

Wir nennen die eine wie die andere dieser Erscheinungen Welle. Wir bedienen uns aber auch desselben Wortes, um die an unser Ohr gelangenden Impulse schallerregender Bewegungen als Schallwelle zu bezeichnen. Haben die Wasser- und die Schallwelle in Bezug auf Entstehung und Fortschreitung, auf Form und Art der Bewegung irgend welche Analogie aufzuweisen? — Da dies, wie Sie im Verlaufe unserer Untersuchungen selbst erkennen werden, vielfach der Fall ist, so wird es nothwendig sein, das Wesen der Welle und zwar zunächst der Wasserwelle einer eingehenden Betrachtung zu unterziehen.

Erblicken wir den um den versunkenen Stein sich erhebenden, und ringförmig fortschreitenden Wasserwulst, oder gar den gegen uns heranrauschenden Wasserwall, der wie ein Individuum aus der Tiefe sich über die Wasserfläche erhoben hat, und nun auf uns zueilt, so sind wir geneigt, diese Erhebungen für wirkliche Wassermassen zu halten, die da auf der Wasserfläche herankommen. Wir werden aus einigen einfachen Versuchen erkennen, dass dem nicht so ist, und dass das, was fortschreitet, nicht die Masse des Wassers, sondern nur die Art seiner Bewegung ist. Es bedürfte im Grunde keines Experimentes, denn der Vergleich mit ähnlichen Erscheinungen würde genügen, uns vor einer irrthümlichen Vorstellung zu bewahren. Jene fortschreitende Bewegung gleichartiger Gebilde, die wir Welle nennen, zeigt sie uns nicht das unter dem Drucke eines leichten Windhauches wogende Aehrenfeld? Die Halme beugen sich schichtenweise nieder; während die nächste Schichte unter dem Drucke des Windes sich zu Boden neigt, erhebt sich die frühere wieder, die Halme schnellen ein wenig zurück, um vielleicht sofort wieder einem

wiederholten Impulse in gleicher Weise zu folgen, — aber — sie bleiben doch stets an ihrer Stelle. — Eine Reihe von Kartenhäuschen steht aneinander gebaut. Das erste, gestossen, bringt das nächste, dieses wieder das folgende zum Sturz. Die Karten aber bleiben licgen. Was die Reihe durchlaufen und niedergeworfen, ist die Folgeerscheinung einer die Störung der Ruhelage, sei es durch Stoss oder Verschiebung des Schwerpunktes, bewirkenden Primitivbewegung.

Die Wasserwelle führt eben solche periodische Bewegungen aus, wie das Pendel, und was bei letzterem als ein horizontales Hin- und Herschwingen erscheint, bildet beim Wasser ein verticales Aufsteigen über und Hinabsinken unter die Ebene des Wasserspiegels.

Dass die Welle in der That nichts anderes ist, als eine fortschreitende isochrone Oscillation, mithin eine Pendelbewegung, lässt sich auf verschiedene Weise demonstriren. Wir wollen einige bezügliche Versuche vornehmen, welche übrigens alle dahin auslaufen, dass man die Pendelschwingung in die Wellenform, oder umgekehrt, letztere in die erstere überführt. Hiezu dienen folgende sehr einfache, mechanische Vorrichtungen. Um zu zeigen, wie die fortschreitende Welle in die Pendelbewegung umgesetzt wird, lässt man eine, auf einem Papier- oder Leinwandstreifen gezeichnete Wellenlinie hinter einem, mit einem Querschlitze *dd* (Fig. 14) versehenen Schirme vorbeigleiten. Die Linie wird als ein in dem Ausschnitte hin- und herpendelnder Punkt erscheinen.

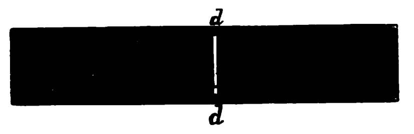


Fig. 14.



Fig. 15.

Den umgekehrten Versuch: eine hin- und hergehende Bewegung in die Wellenform zu verwandeln, mögen Sie selbst ausführen, indem Sie mit der zwischen *cc* (Fig. 15) beweglichen Stange *a*, deren Ende einen Kreidestift trägt, über diesen schwarzen Papierstreifen *b* Pendelbewegungen machen und den Streifen in der Pfeilrichtung darunter wegziehen.

Entfernen Sie die Stange *a* und schieben Sie den Papierstreifen zurück, so wird die Wellenlinie in dem Ausschnitte *dd* als Punkt hin- und herpendeln.

Sendet man durch eine durchlöcherte Scheibe *a* (Fig. 16), die an einem schwingenden Stabe befestigt ist, einen Lichtstrahl, den man

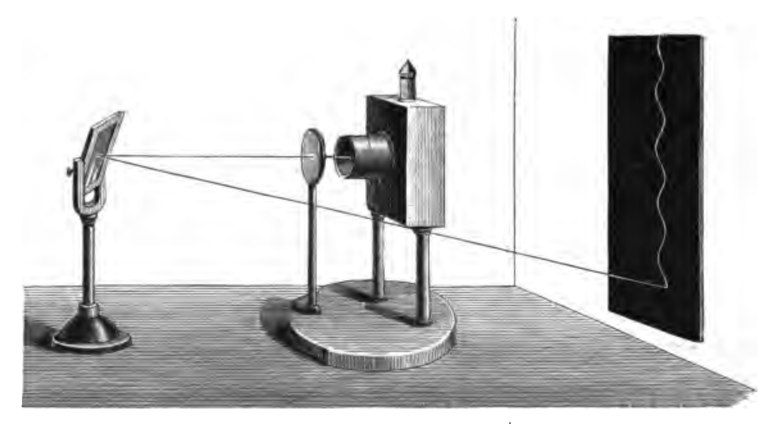


Fig. 16.

mittelst eines Planspiegels gegen einen Schirm oder eine sonstige helle Fläche projicirt, so bildet der vibrirende Lichtpunkt eine Linie,

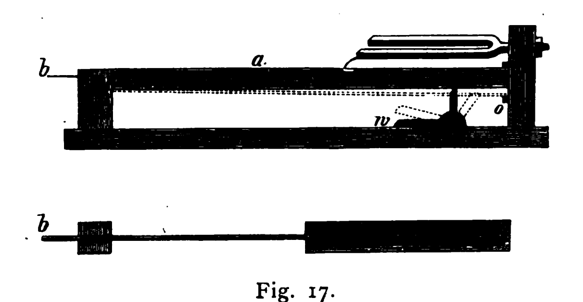


Fig. 17.

a Schlitten, *b* Glasstreifen, *o* Stellung des Schlittens, wenn der Hebel *w* gehoben wird.

die, wenn der Spiegel senkrecht zu dieser Linie bewegt wird, das Bild einer fortschreitenden leuchtenden Welle darbietet.

Lässt man eine Stimmgabel auf einen berussten, fortgleitenden Glasstreifen ihre Schwingungen automatisch aufzeichnen (Fig. 17),

so kann man diese mittelst des Projectionsapparates (Fig. 18) in vergrössertem Masse sichtbar machen, oder mit dem Mikroskope oder

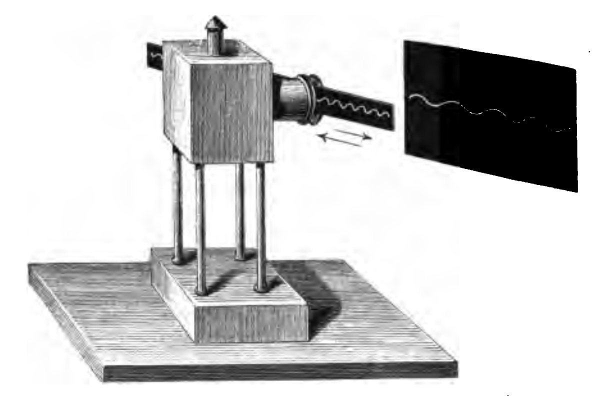


Fig. 18.

der Loupe beobachten. Auch eine ziemlich exacte Methode zur Bestimmung von Schwingungszahlen gegebener Tonhöhen, auf welche Methode wir seinerzeit zurückkommen werden, lässt sich mittelst des Schreibapparates (Fig. 17) ausführen.

---

3. Vortrag.

(Fortschreitende und stehende Wellen. — Superposition. — Interferenz. — Reflexion. -- Die Seilwelle.

Ich hatte das letztemal Ihre Phantasie aufgefordert, dem Spiele der Wellen, wie es sich dem am Gestade einer Wasserfläche weilenden Beschauer darbietet, zuzusehen, und versuchte es, Ihnen das Wesen dieser Gebilde und die Gesetze ihrer Bewegung zu erklären und zu versinnlichen. Die von uns vorgenommenen verschiedenartigen Versuche haben uns zunächst darüber belehrt, dass die Bewegung einer Welle in den wesentlichsten Punkten mit jener eines Pendels übereinkommt, denn beide sind periodisch und isochron (zeitgleich). — Der Unterschied, der sich in der äusseren Erscheinung dieser beiden Bewegungsarten zeigt, rührt lediglich daher, dass das Pendel seine Bewegungen an Ort und Stelle, die Welle dagegen die ihren im Fort-

schreiten vollführt. Wir werden aber bald Umstände kennen lernen, unter welchen die Welle auch eine Form annehmen kann, in der ihre Bewegung sich innerhalb örtlich feststehender Grenzen vollzieht, gleich wie jene des Pendels.

Führen wir gegen einen in senk- oder wagrechter Richtung mässig gespannten fadenförmigen Körper, etwa ein Seil, einen kurzen Schlag, so erzeugen wir damit an der Berührungsstelle eine momentane Ausbiegung, die sich längs des Seiles rasch fortpflanzt.

Jede Stelle des Seiles wird alle Phasen dieser Ausbiegung machen, jede um einen Zeitmoment später, aber die Stellen selbst sind nicht fortgerückt.

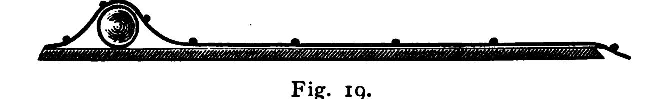


Fig. 19.

Ich führe unter diesem, am Rande seiner Längsrichtung mit einigen glänzenden Perlen benähten Tuchstreifen (Fig. 19) eine Walze hinweg. Jeder Punkt wird hintereinander eine gleiche Bewegung machen wie die Perle, er wird auf-, dann absteigen, also eine Pendelbewegung ausführen; die Wellenform schreitet fort, aber die Punkte bleiben, nachdem sie zur Gleichgewichtslage zurückgekehrt sind, gleichwie unsere Perle auf derselben Stelle, wo sie vordem gewesen.

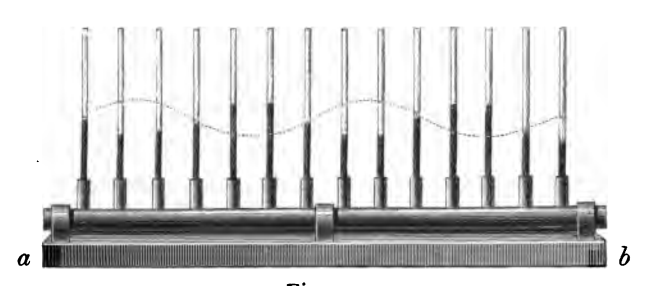


Fig. 20.

Betrachten wir nun aber eine wirkliche Wasserwelle. — In diesem communicirenden Röhrensystem (Fig. 20), bestehend aus einer beliebigen Menge in gleichen Abständen in ein gemeinsames Rohr mündender, beiderseitig offener Glasröhrchen, die bis ungefähr zur halben Höhe mit Wasser gefüllt sind, errege ich durch Heben des

Apparates bei *a* oder *b* eine Wellenbewegung. Das Wasser steigt, der Wellenform folgend, in den einzelnen Röhrchen auf und ab, aber es schreitet nicht fort, da es in die Röhren gebannt ist. Ich werde das Wasser in einigen der Röhren färben und nun die Welle erregen. Eine Vermischung der Flüssigkeiten wird gleichwohl nicht stattfinden, was beweist, dass auch die kleinsten Wassertheilchen eine fortschreitende Bewegung in horizontaler Richtung nicht ausführen, sondern an Ort und Stelle bleiben und nur um ihre ursprüngliche Lage auf- und abschweben. Endlich werden Sie sogleich eine Erscheinung beobachten können, die zu sehen Sie vielleicht schon in der Lage waren. Wenn in dem Teiche, in welchen Sie Steinchen geworfen, vielleicht ein Stückchen Holz, ein Strohhalm, ein Blatt schwamm, und die von Ihrem Steinwurfe erregte, ringförmig sich ausbreitende Welle immer grössere Kreise zog, so konnten Sie bemerken, dass das Holz, das Blatt, der Strohhalm, sobald der Wellenring in deren Nähe kam, zu schaukeln begannen, auf- und abschwankten, aber doch an Ort und Stelle blieben und zur Ruhe gelangten, während die Welle immer weiter zog.

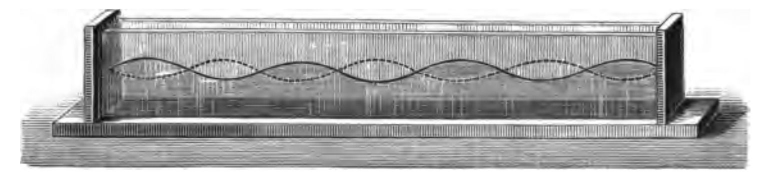


Fig. 21.

Ich werfe in diese, aus zwei, in ein Holzgestell eingekitteten Glasstreifen gebildete, 2—3 Centimeter breite und etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllte Rinne (Fig. 21) ein Stückchen Kork, einen Strohhalm und eine Glasperle und errege eine Welle. Sie beobachten hier genau wieder das soeben Gesagte. Halm, Kork und Perle werden von der Welle gehoben, dann sinken sie, steigen wieder, fallen wieder, rücken aber in horizontaler Richtung weder vor noch zurück, sie bleiben an ihrer Stelle.[1])

[1]) Diese Erscheinung hat allerdings den isochronen Verlauf des Wellenzuges zur Voraussetzung. Unregelmässige und heftige Wellengebilde, z. B. Sturzwellen, treiben, vermöge der mechanischen Stoss- oder Wurfgewalt ihrer Schwere, schwimmende Gegenstände vor sich her. Wir werden ähnlichen, durch Uebermass entstehenden Anomalien auch auf dem Gebiete der Gehörserscheinungen begegnen.

Begeben wir uns nochmals an das Ufer des Teiches. Werfen wir abermals, aber nicht ein, sondern mehrere Steinchen zugleich auf verschiedene Punkte der Wasserfläche. Wir werden da eine sehr interessante und überaus lehrreiche Wahrnehmung machen.

Jedes Steinchen bildet seinen fortschreitenden, immer grösser werdenden Wellenkreis. Diese Kreise treffen aufeinander, ziehen über- und zwischeneinander, aber die einzelnen Kreise selbst werden nicht gestört, jede Welle setzt, trotz der vielfachen, gegenseitigen Durchkreuzungen, ihren ursprünglichen Weg unbehindert fort. Man nennt dies die Superposition (Ueberlagerung) von Wellensystemen, und die in Figur 22 mit + bezeichneten Stellen des Zusammentreffens der entgegengesetzten Wellenringe: Interferenzpunkte. Die nähere Erklärung dieser Erscheinung in ihrer Beziehung auf die Akustik werden wir später kennen lernen.

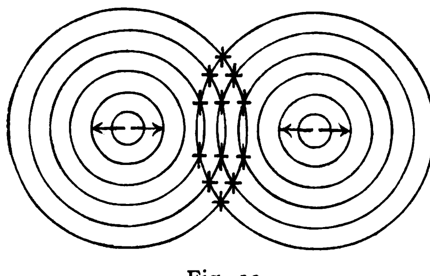


Fig. 22.

Wodurch nun entsteht die Welle und was bedingt ihre Form? Die Antwort liegt in den beiden folgenden Sätzen, an deren jeden sich die nöthigen Erläuterungen anschliessen werden.

Der erste Satz lautet:

Die Welle ist nichts anderes, als der Ausdruck des gestörten Gleichgewichtes. Der diese Störung veranlassende Primitivimpuls ist der Druck der Schwere, der, möge er senkrecht auf die Ebene oder parallel zu ihr erfolgen, die Theilchen senkt oder hebt. Der Druck, erfolge er durch den Anprall starrer, flüssiger oder luftförmiger Körper (Ruder, Felsenriffe, Regen, Wind), übt Gegendruck, und zwar seitlich nach allen Richtungen des Druckcentrums. Die gestossenen Theilchen können, da das Wasser nahezu nicht zusammendrückbar ist, in der Richtung der Gleichgewichtslage nicht ausweichen, wohl aber in das leichtere Medium: die Luft. Der Druck treibt also die Wassertheilchen in die Höhe und bildet den Wellenberg. Nun aber beginnt das Gewicht, die Schwerkraft des Wassers zu wirken. Dieses drückt die Wassertheilchen mit beschleunigter Geschwindigkeit zur Ruhelinie und darunter hinab, und es entsteht das Wellenthal. Würde die Wasserfläche so be-

grenzt sein, dass die Welle nicht fortschreiten kann, so wird sie, ihre Bewegung fortsetzend, zurückkehren, aber in umgekehrter Weise, so dass Berg in Thal, Thal in Berg verwandelt werden[1]), wie das an unserem Seile deutlich zu sehen ist, wenn wir, den früheren Versuch wiederholend, durch einen von unten nach oben geführten Schlag einen Wellenberg erregen. Derselbe, am Befestigungspunkte, der als das Ufer anzusehen ist, angelangt, lauft als Wellenthal zurück.

Man nennt die lineare Strecke, um welche ein Wellenberg und das ihm vorangehende oder folgende Wellenthal fortschreitet, eine Wellenlänge, zu deren Bezeichnung der griechische Buchstabe Lambda λ gebräuchlich ist; mehrere Wellenlängen nennt man einen Wellenzug; die Zeit, in der die Wellenlänge λ fortschreitet: die Fortpflanzungsgeschwindigkeit τ; die Strecke, die eine Welle in dieser Zeit τ durchläuft: die Weglänge, die wir mit W bezeichnen wollen.

Der zweite Satz lautet:

Die Gestalt der Welle ist durch den Aggregatzustand des Mediums bedingt, in welchem sie durch die Primitivbewegung erregt wird. Bekanntlich sind es drei Formen, in welchen Körper zur Erscheinung gelangen, nämlich als feste, flüssige oder luftförmige. Man nennt dies Aggregatzustand eines Körpers. Viele Körper können in alle drei Aggregatzustände übergeführt werden, so z. B. Wasser, das man in Eis und Dampf verwandeln, Metalle, die man schmelzen und verdampfen, die gasförmige Kohlensäure, die man durch Druck flüssig, dann fest machen kann.

Kehren wir nach dieser Abschweifung wieder zu unserem Gegenstande zurück. Würde beispielsweise das Wasser ein so elastischer, feiner, dem leisesten Drucke weichender Stoff sein, wie es die Luft ist, so würden Wellen von der Form der Wasserwelle nicht entstehen können. Das Wasser, welches jetzt eine seitliche Ausweichung in der Ebene seiner Fläche nicht ausführen kann, sondern sich wegen

[1]) Der Einfluss der Molecularkräfte, die jedes Theilchen zwingen, dem vorangehenden zu folgen, und bei der Wellenbildung wesentlich mitwirken, muss als zu weit führend hier ausser Betracht bleiben; ebenso die Theorie der Wellenbildung durch die Kreisbewegung der einzelnen Wasserpartikelchen, worüber die Wellenlehre der Geb. Weber nähere Aufschlüsse gibt.

der Unzusammendrückbarkeit seiner Theilchen zu einem Wall aufstaut, weil die Luft dieser Bewegung so viel wie keinen Widerstand entgegensetzt, würde — wäre es von luftförmiger Beschaffenheit — dem Stosse in linearer Richtung weichen, indem die den Stosspunkt umgebenden Theilchen den angrenzenden Theilchen momentan näher rücken, und damit eine Verdichtung erzeugen können, die sich ebenso (wie die Wasserwelle durch Hebung und Senkung) in ebener Richtung ringförmig ausbreiten, beziehungsweise fortpflanzen würde, ohne dass die Theilchen selbst fortschreiten.

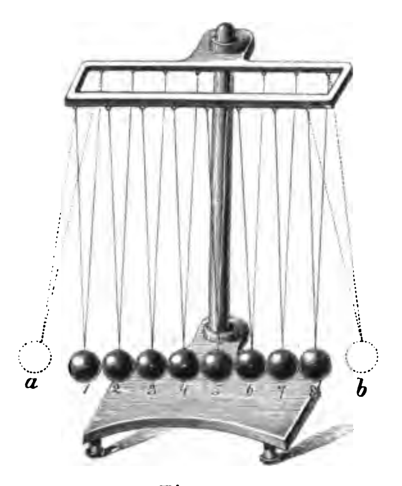


Fig. 23.



Fig. 24.

Da die Theilchen, indem sie nicht weiterschreiten, sondern nur eine Schwingung um ihre Ruhelage vollführen, in der Verdichtungslage nicht verharren können, also wieder zurückschwingen müssen, sobald sie den empfangenen Stoss dem nächsten Theilchen mitgetheilt haben, um ihre frühere Lage einzunehmen, so werden sie auf dem Rückwege hinter sich eine Verdünnung erzeugen, die sich dann ebenfalls wieder ausgleicht, um die ursprüngliche Dichtigkeit herzustellen. Eine Vorstellung von der Fortpflanzung eines Primitivstosses gibt Ihnen dieser, aus einer Reihe an Schnüren hängender und sich berührender gleicher Kugeln, bestehende Apparat (Fig. 23).

Zieht man eine Kugel, beispielsweise die mit 1 bezeichnete, etwa bis *a* beiseite und lässt sie los, so wird die Kugel 8 am anderen Ende ebensoweit, also bis in die Lage *b* weggeschnellt werden, als die erste entfernt wurde. Alle übrigen Kugeln bleiben ruhig. Was die Reihen durchlief, ist die Kraftfortpflanzung des Primitivstosses. Das Experiment lässt sich auch mit einer Reihe gleicher Münzstücke ausführen (Fig. 24).

Wenden wir nun unsere bisher gewonnene Kenntniss, zu welcher uns die Beobachtungen der Wasser- und der Seilwelle geführt haben, auf die Schallwelle an, deren Bewegungsart wir später noch eingehender betrachten werden, so lassen sich daraus folgende akustische Gesetze ableiten:

1. Die durch Vibrationen des tönenden Körpers erregte Bewegung ist eine moleculäre, d. h. eine solche, die sich in der Weise fortpflanzt, dass jedes Lufttheilchen den empfangenen Primitivimpuls dem nächsten Lufttheilchen mittheilt, während es selbst blos oscillirende, von Verdichtung und Verdünnung begleitete Bewegungen um seine Ruhelage macht.

2. Die durch eine Primitivbewegung erregte Welle legt in einer bestimmten Zeit (τ) eine bestimmte Weglänge (Strecke *W*) zurück, gleichviel ob ihr eine zweite Primitivbewegung nachfolgt oder nicht.

Da die Welle mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortschreitet, so wird die Wellenlänge (λ) von der Dauer des Zeitverflusses

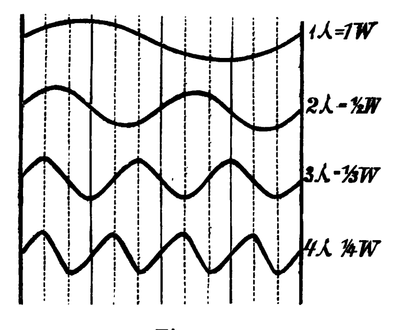


Fig. 25*a*.

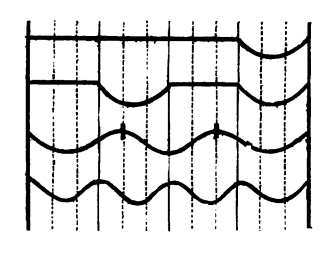


Fig. 25*b*.

zwischen den einzelnen Primitivbewegungen abhängen. Je rascher letztere aufeinanderfolgen, umsomehr Wellen (λ) werden sich zur gegebenen Zeit (τ) auf der Strecke (*W*) ausbreiten, wie solches die schematische Darstellung, Fig. 25 *a*, ersehen lässt.

3. Da jede Welle dieselbe Strecke in derselben Zeit durchläuft, so werden alle gleichzeitig erregten Wellen, gleichviel welches ihre Länge ist, gleichzeitig das Ende der Strecke erreichen, wie dies in der Figur 25 *b* angedeutet erscheint.

Weil nun von der Zahl der in einer bestimmten Zeit aufeinander folgenden Wellen, beziehungsweise von den, in derselben Zahl und Zeit erfolgenden Primitivimpulsen dasjenige abhängt, was wir Tonhöhe nennen, und demnach höhere Töne kürzere, tiefere längere Wellen haben, so folgt daraus, dass die Töne, mögen sie hoch oder tief sein, sobald sie gleichzeitig entstehen, auch gleichzeitig an unser Ohr schlagen, möge dieses näher oder weiter von der Tonquelle entfernt sein. Eine Verspätung des einen oder anderen Tones tritt nicht ein.

Dieses Gesetz gilt natürlich nur für die Fortpflanzung der Schallwelle in demselben Mittel (Medium); denn der Klang, wie wir dies später erfahren werden, pflanzt sich in verschiedenen Medien mit verschiedener Schnelligkeit fort. Die Schallwelle wird in dem besser leitenden Medium in derselben Zeit rascher vorwärts kommen, daher länger sein, und deshalb schneller zu unserem Ohre gelangen. Specielle Beispiele werden bei Betrachtung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles geliefert werden. Für jetzt nur einige Andeutungen.

Dafür, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles eine im Verhältnisse zu anderen Bewegungen (z. B. der des Lichtes) ziemlich geringe ist, zumal in der Luft, können beispielsweise als Beweise gelten: das scheinbare Nichtzusammentreffen der Schritte mit dem Rhythmus der Trommel bei einer in geringer Entfernung beobachteten marschirenden Truppe; die Verspätung des Schlages gegen die Bewegung eines in einiger Distanz arbeitenden Steinklopfers und dergleichen, ebenso der Zeitverfluss zwischen Blitz und Knall der Kanone oder bei Gewittern, das Echo, und viele derartige Erscheinungen.

Das vierte Gesetz lautet: An verschiedenen Punkten erregte Wasserwellen können sich, wie schon früher erwähnt wurde, durchkreuzen, ohne sich in ihrer Ausbreitung zu hindern und ohne sich in der Fortsetzung des einer jeden Welle eigenthümlichen Weges gegenseitig zu stören. Man muss annehmen, dass es mit den Schallwellen ein gleiches Bewandtniss habe, weil es anders nicht möglich wäre, es zu erklären, wie die vielen, nach Höhe und Tiefe wie nach Stärke und Klangfarbe verschiedenen, gleichzeitig erklingenden Töne, beispielsweise eines Orchesters oder einer Orgel, von uns genau unterschieden werden können. —

Wir gelangen nunmehr zur Betrachtung der Erscheinungen, welche durch die Zurückwerfung, die sogenannte Reflexion der Wellen, entstehen.

Wenn eine Welle sich ungehindert in demselben Medium ausbreiten, d. h. fortpflanzen kann, so wird sie immer weiter gehen, aber ihre Hebungen und Senkungen werden immer mehr dem Gleichgewichtsniveau sich nähern; sie werden seichter aber nicht kürzer werden (da die Abstände, gleichwie Pendelausschläge, isochron bleiben), und endlich kommen sie zur Ruhe, gleichwie das Pendel. Trifft die Welle auf einen Widerstand und kann sie ihn nicht durch Beugung umgehen, so wird sie keineswegs vernichtet. Was man unter Beugung im physikalischen Sinne versteht, will ich Ihnen kurz erklären. Wasser, welches durch ein im Flusse liegendes Felsstück gezwungen ist, sich zu theilen, vereinigt sich sofort hinter diesem. Diese Erscheinung nennt man Beugung. Offenbar vollführen Schallwellen in gleicher Weise Beugungen, weil sonst beispielsweise ein vor einem Pfeiler entstandener Ton von einem hinter dem Pfeiler Stehenden nicht vernommen werden könnte. Eine auf einen, durch Beugung nicht zu umgehenden Widerstand stossende Welle wird, wie gesagt, keineswegs vernichtet; sie kehrt den Weg zurück, den sie gekommen, mit derselben Schnelligkeit und mit derselben Amplitude, mit der sie anprallt. Aber, und hierin beruht der einzige, jedoch überaus wesentliche und wichtige Unterschied, sie verkehrt ihre Richtung. Sie beginnt den Rückweg mit jener Phase, in die sie eingetreten wäre, wenn sie auf ihrem Wege kein Hinderniss gefunden hätte. Man nennt diese Umkehr Reflexion, Zurückwerfung.

Durch die Reflexion wird das Thal zum Berg, der Berg zum Thal, und so umgewandelt kehrt die Welle in der neuen (rückläufigen) Richtung mit derselben linearen Länge und mit derselben Schnelligkeit zurück, bis sie entweder zur Ruhe gelangt, oder durch ein Hinderniss abermals zur entgegengesetzten Richtung und Phase genöthigt wird.

Trifft nun die reflectirte Welle auf ihrem Rückwege auf eine directe, ihr entgegenkommende Welle von gleicher Länge, so wird eine neue Erscheinung eintreten. Dort nämlich, wo der Anfang eines Wellenberges und der eines ihm entgegenkommenden Wellenthales aufeinander treffen, wird ein Punkt der Ruhe werden

müssen. Der Vordertheil des Wellenberges hat das Bestreben, die Theilchen in die Höhe zu ziehen, während der Vordertheil des ihm entgegenkommenden Wellenthales die Theilchen hinabziehen möchte. Die entgegengesetzten Kräfte, die sich auf dem Punkte, wo sie aufeinander treffen, aufheben, bewirken nothwendig den Stillstand dieses Punktes.

Man bezeichnet diesen Vorgang mit dem Worte Interferenz (Gegenwirkung). Wir werden die Wirkungen der Interferenz hier vorerst nur insoweit in Betracht ziehen, als es sich um die Wellenbildung handelt.

Damit es zur Interferenzerscheinung gelange, ist es nothwendig, dass zwei oder mehrere Kräfte in gleicher oder entgegengesetzter Richtung aufeinander wirken.



Fig. 26.

Betrachten wir, versinnbildlicht durch die beiden ganz gleichen und übereinander verschiebbaren Zeichnungen eines Wellenzuges (Fig. 26), die Ergebnisse des ersten Falles. Es sollen zwei Wellenzüge von gleicher oder verschiedener Länge in gleicher Richtung

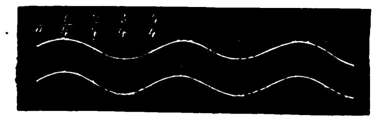


Fig. 26 *a*.

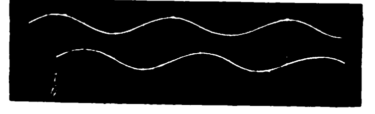


Fig. 26 *b*.

gleichzeitig fortschreiten. Was wird geschehen? Im ersten Falle werden ihre Berge doppelte Höhe, ihre Thäler doppelte Tiefe annehmen, wenn beide Wellen in gleicher Phase fortschreiten, denn sie verstärken sich auf allen Punkten (Fig. 26 *a*). Sind sie aber um die Phase einer $^1/_4$- (Fig. 26 *b*) oder $^3/_4$- (Fig. 26 *c*) Länge auseinander, so werden sie sich theilweise verstärken, theilweise schwächen; be-

trägt die Phasendifferenz endlich $^1/_2$ Länge, so treffen Berg auf Thal, Thal auf Berg (Fig. 26 *d*) und die Kräfte heben sich auf.

In der Form nun, die sie vermöge ihrer Phasen durch die Interferenz der Kräfte erhalten, schreiten die beiden Wellen, insoweit sie nicht vernichtet worden sind, in gleichem Zeitmasse fort, da ihre Länge die gleiche ist. Differiren aber ihre Längen, so werden sich die Wellen trennen, sobald sie den Interferenzpunkt überschritten haben, und es wird von da ab jede für sich ihren Weg mit der ursprünglichen Länge, mithin auch Geschwindigkeit fortsetzen. Periodische Interferenzen (z. B. Schwebungen) können also auf diese Weise nie entstehen.

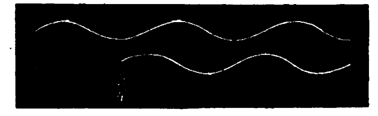


Fig. 26*c*.

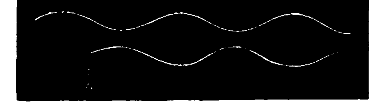


Fig. 26*d*.

Wollen wir nun den Fall, wo zwei Wellen entgegengesetzter Richtung aufeinander treffen, betrachten, so müssen wir die Seilwelle zu Rathe ziehen, denn die Wasserwelle versagt uns hier den Dienst, und zwar aus dem einfachen Grunde, weil sie, erzeugen wir sie auch in noch so begrenztem Raume, nicht als Ganzes Hebungen oder Senkungen innerhalb dieses Raumes zu vollführen vermag, d. h. in einem Momente nicht blos Berg ohne Thal, oder nur Thal ohne Berg darstellen kann, und zwar deshalb nicht, weil die Wasserwelle ihre charakteristische Form nur dadurch erhält, dass ihre Theile in das leichtere Medium, die Luft, ausweichen können. Sie bewegen sich — wissenschaftlich ausgedrückt — in einem homogenen (gleichartigen) aber nicht isotropen (gleichdichten) Mittel.

Anders beim Seile, beim Stabe, bei der Saite, bei der Luftsäule, der Platte, der Membrane, die sich alle in jeder Richtung in demselben (isotropen) Medium, nämlich im lufterfüllten Raume bewegen.

Betrachten wir die Welle, wie sie über das Seil hinzuckt, wenn wir durch einen kurzen Schlag oder Ruck eine kleine Ausbiegung des Seiles hervorrufen. Sie wird folgenden Verlauf nehmen (Fig. 27). Bewegt sie sich als Berg hin, so kehrt sie als Thal zurück, oder umgekehrt, kurz sie verkehrt ihre Richtung.

Nun wollen wir aber dasselbe Seil von gleicher Länge langsam hin- und herschwingen. Wir erzeugen mit dieser Bewegung ebenfalls etwas Aehnliches wie Berg und Thal, aber es ist doch ein wesentlich anderes Gebilde. Der Berg läuft nicht weiter, das Thal ebenfalls nicht, sie bleiben innerhalb der beiden festen Endpunkte an Ort und Stelle und, wenn wir die Bewegung am hängenden Seile ausführen, so haben wir weder Berg noch Thal, sondern die reine Pendelbewegung: die Oscillation um die Ruhelage (Fig. 28).

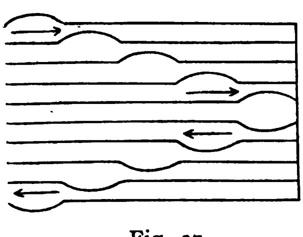


Fig. 27.

Hier muss ich Sie — gleichsam in der Parenthese — auf zwei interessante Momente aufmerksam machen. Erstens ist die Bewegung, um diese zweite Art Wellen hervorzurufen, durchaus keine willkürliche, wie es den Anschein hat. Das Tempo der Schwingung wird durch die Länge und Spannung des Seiles genau bestimmt.

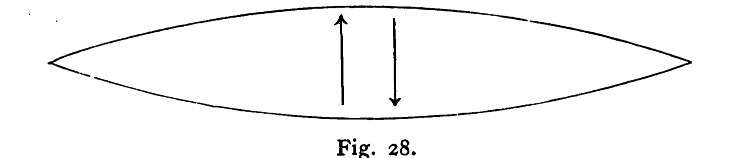


Fig. 28.

Wenn Sie nun dieses Tempo für eine Hin- oder eine Herschwingung mit der Zeit vergleichen, welche die fortschreitende Welle braucht, um das Seil hin oder zurück zu durchlaufen, so werden Sie finden, dass — bei ungeänderter Spannung — jede dieser Wellen genau dieselbe Zeit zu ihrer Vollendung bedarf. Ein Versuch, den wir jetzt mit Zuhilfenahme des Metronoms ausführen wollen, wird dies bestätigen. —

Wellen letzterer Art nennt man stehende, im Gegensatze zu jenen bisher betrachteten, die man, gleichviel, ob sie von uns sich bewegen oder auf uns zukommen, als fortschreitende Wellen bezeichnet.

Wir werden uns den wesentlichen Unterschied dieser beiden Wellenarten, die gleichwohl bei der Erzeugung und Fortpflanzung des Schalles sich sozusagen in die Hände arbeiten, nunmehr durch mancherlei Betrachtungen klar zu machen suchen.

Stellen wir uns die Kraftrichtungen der einzelnen Theilchen in der fortschreitenden Welle vor. An jedes Theilchen kommt die Reihe, seine oscillatorische Bewegung auszuführen, progressiv (an die vorangehenden früher, an die folgenden später), wie solches mit dem Tuchstreifen (Fig. 19) bereits demonstrirt wurde. Zerlegen wir Berg

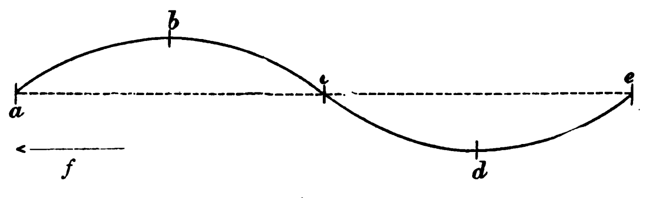


Fig. 29.

und Thal je in zwei Theile (Fig. 29), so bekommen wir einen vorangehenden (*ab*), und einen folgenden (*bc*) Theil des Berges und in gleicher Weise (*cd* und *de*) des Thales. Bewegt sich die

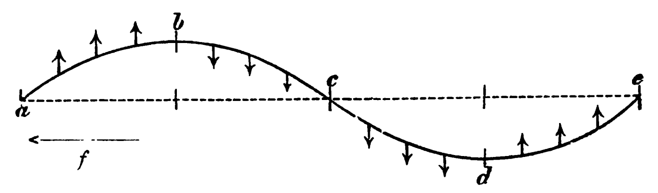


Fig. 30.

Welle in der Richtung des Pfeiles *f* (Fig. 30), so werden in dem Vordertheile des Berges (*ab*) die, durch die kleinen Pfeile bezeichneten Theilchen das Bestreben haben, eines nach dem andern die Spitze der Welle zu erklimmen, gleichwie es unsere Perle am Tuchstreifen gethan, während der Rücktheil des Berges (*bc*), der Schwere gehorchend, nach abwärts strebt und dieses Streben auch im Vordertheile des folgenden Theiles (*cd*) beibehält, bis es den tiefsten Punkt (*d*) erreicht hat, um nun als Rücktheil (*de*), dem Drucke gehorchend, aufwärts zu streben, wie dies die Pfeilrichtungen andeuten.

In der stehenden Welle gibt es weder Vordertheil noch Rücktheil. Alle Punkte, die in der fortschreitenden Welle allmälig (progressiv) ihre Bewegungen vollführen, machen sie in der stehenden zu gleicher Zeit in derselben Richtung, und nur ihre Amplitude ist

ihrer Lage gemäss eine verschiedene; die Amplituden selbst aber sind isochron.

Nehmen wir unser früheres Beispiel auf, und erregen wir eine stehende Welle, jedoch nicht, wie dort, in der ganzen Länge des Seiles, sondern nur in einer Hälfte desselben. Wir halten die Mitte des Seiles fest, führen auf die Mitte der abgegrenzten Hälfte einen Schlag, oder ziehen sie an gleicher Stelle bei Seite und lassen sie los (Fig. 31 *a*). Diese Hälfte oscillirt.[1])

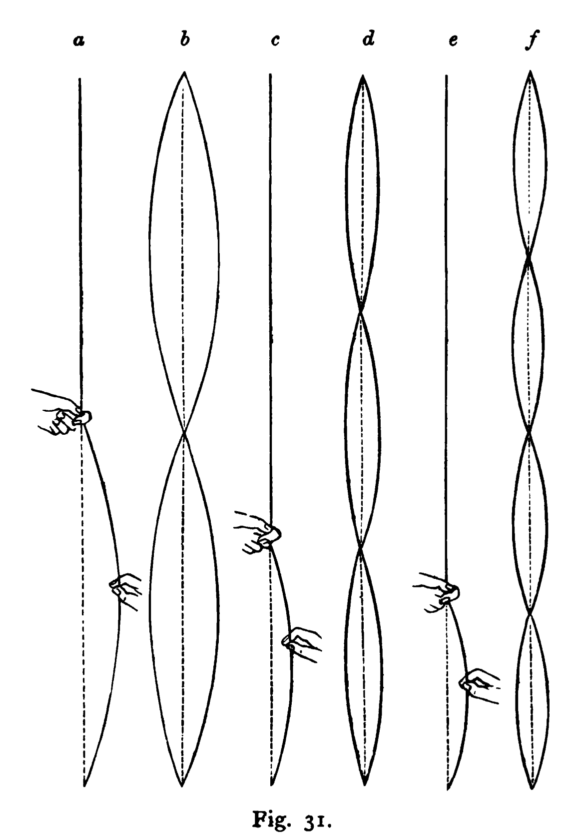


Fig. 31.

Aber eine neue Erscheinung tritt hinzu, denn auch die andere Hälfte des Seiles macht, ohne einen äusseren Impuls erfahren zu haben, dieselbe Schwingung (Fig. 31 *b*), jedoch — wie wir später des Näheren erkennen werden — in entgegengesetzter Phase; und die beiden Hälften werden ihre stehenden Schwingungen auch dann fortsetzen, wenn wir das Seil nicht mehr in der Mitte halten. Diese Stelle, die Mitte nämlich, wird auch jetzt, wo sie nicht fixirt ist, scheinbar ohne Bewegung sein.[2])

[1]) Spätere Versuche werden uns lehren, dass die Zerlegung gespannter fadenförmiger Körper in Theilschwingungen in den abwechselnden Spannungsverhältnissen in der Längsrichtung, die in Folge der Ausbiegung eines Theiles des Ganzen erfolgen, also in den wechselnden Intensitäten der Zugkraft ihren Entstehungsgrund hat.

[2]) Wir können den gleichen Versuch mit dem dritten, vierten u. s. w. Theile des Seiles (Fig. 31 *c*, *d*, *e*, *f*) anstellen und werden zu analogen Re-

Vergleichen wir die Bewegungsrichtung der Theilchen unserer stehenden Welle. Bei der fortschreitenden gab es, ausser den beiden Endpunkten, keinen Punkt der Ruhe. Alle die Welle bildenden Theilchen erreichten nacheinander den höchsten und tiefsten Punkt. Vorder- und Hintertheil von Berg und Thal waren in entgegengesetzter Bewegungsrichtung (vergl. Fig. 32). Hier aber ist Alles anders. Hier spaltet sich die Welle in zwei Hälften von ganz gleicher

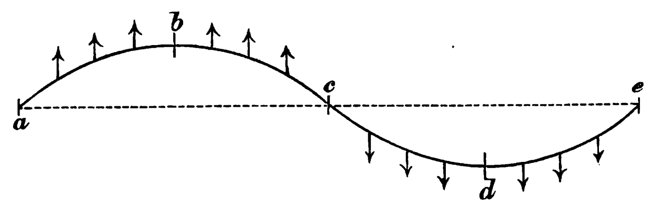


Fig. 32.

Beschaffenheit aber entgegengesetzter Phase. Jedes Theilchen beginnt und vollendet zu gleicher Zeit seine Oscillation senkrecht zu seiner Ruhelage, jedes Theilchen jedoch mit einer anderen Amplitude. Zwischen je zwei Halbwellen (ac und ce) befindet sich ein Punkt der kleinsten Bewegung (c). Man nennt diese Punkte Knoten und man muss sie als eingeschaltete feste Abgrenzungen betrachten. In der Mitte zwischen zwei Knoten liegendie Stellen der grössten Elongation (b und d). Man nennt sie Bäuche.

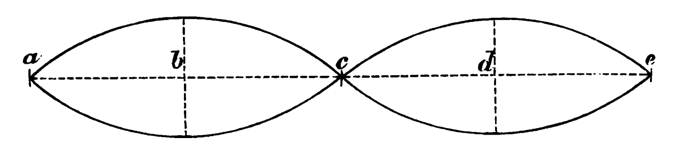


Fig. 33.

Um für spätere Betrachtungen hier schon eine richtige Vorstellung zu gewinnen, kann jede stehende Welle als aus zwei aneinander stossenden Hälften bestehend angesehen werden. Da nun

---

sultaten gelangen, nämlich, dass im ersten Falle, wenn wir $^1/_3$ der Länge abgrenzen und schnellen, das zweite und dritte Drittel von selbst in gleiche Schwingungen geräth, was im letzteren Falle, wenn wir ein Viertel des Seiles abgrenzen und in Schwingung versetzen, bezüglich des zweiten, dritten und vierten Viertels des Seiles erfolgen wird.

die stehende Welle, aus der Reflexion der fortschreitenden gebildet, die halbe Länge der letzteren beträgt, so bleibt diese Länge gleich, ob wir von Bauch zu Bauch oder von Knoten zu Knoten zählen (Fig. 33).

Demnach ist die Strecke $a—e = \lambda$

$$\left.\begin{array}{lll} » & » & a—c \\ » & » & b—d \\ » & » & c—e \end{array}\right\} = \frac{\lambda}{2}$$

$$\left.\begin{array}{lll} » & » & a—b \\ » & » & b—c \\ » & » & c—d \\ » & » & d—e \end{array}\right\} = \frac{\lambda}{4}$$

Bekanntlich bedeutet λ eine Wellenlänge, $\frac{\lambda}{2}$ eine halbe Wellenlänge, $\frac{\lambda}{4}$ eine Viertelswellenlänge. [1])

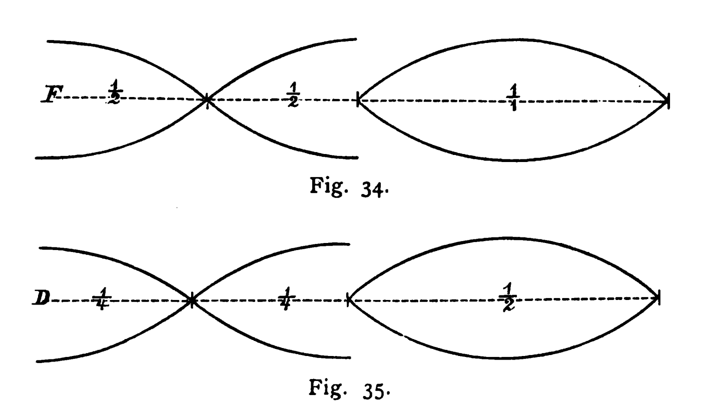


Fig. 34.

Fig. 35.

Vergleichen wir endlich die Zeit, welche die stehende Welle des ganzen Seiles zu einer Schwingung benöthigt, mit der Zeit, in welcher unsere Halbwelle eine Schwingung vollbringt, so werden

[1]) Die französischen Akustiker geben — in Consequenz ihrer Art, die Schwingungen einfach zu zählen — der stehenden Welle die gleiche Länge der fortschreitenden, daher die Wellenlänge (λ) nach französischer Auffassung um die Hälfte kürzer ist, als nach der deutschen (z. B. Fig. 34 und 35).

Demgemäss würden nach dieser Zählweise die Strecke *ae* mit 2λ, die Strecken *ac*, *bd*, *ce* mit λ, und jene *ab*, *bc*, *cd* und *de* mit $\frac{\lambda}{2}$ zu bezeichnen sein.

wir finden, dass sie bei letzterer genau die Hälfte beträgt. Und so haben wir eines der wichtigsten Gesetze der Akustik gefunden, indem wir gewahr wurden, dass die Hälfte eines gespannten, fadenförmigen Körpers bei gleicher Spannung genau noch einmal so viel Schwingungen in derselben Zeit macht, als das Ganze, oder kurz: dass die Schwingungszahl im umgekehrten Verhältnisse zur Länge steht. Uebertragen wir diesen Satz ins Musikalische. Wir sahen, dass die Hälfte unseres Seiles bei gleicher Spannung noch einmal so viele Schwingungen in derselben Zeit macht, als dessen ganze Länge. Dasselbe wird auch bei einer Saite der Fall sein. Vergleichen wir den Ton einer zur Hälfte verkürzten Saite mit jenem ihrer ganzen Länge, so erkennen wir das Intervall der Octave. Hieraus geht also hervor, dass die Schwingungszahl der Octave sich zu jener des Grundtones wie 2 : 1, die Saitenlänge aber wie 1 : 2 verhält.

---

4. Vortrag.

(Quer- und Längsschwingungen.)

Wir haben am Schlusse des vorigen Vortrages experimentell gefunden, dass die Hälfte eines gespannten, fadenförmigen Körpers, bei gleicher Spannung, genau noch einmal so viel Schwingungen in derselben Zeit macht, als das Ganze — und konnten daraus eines der Fundamental-Gesetze der Akustik ableiten, dahin lautend: dass die Schwingungszahlen im umgekehrten Verhältnisse zu den Längen stehen. Kürzen wir also die Länge z. B. auf ein Drittheil, so wird dieses dreimal schneller schwingen, hingegen wird der Körper drei- oder viermal langsamer schwingen, wenn wir seine Länge bei gleicher Spannung verdreifachen oder vervierfachen.

Betrachten wir jetzt das Wesen der stehenden Welle etwas näher. Die stehende Welle — wiewohl es den Anschein hat, als werde sie durch die Primitivbewegung (Stoss, Reissen, Streichen, Blasen) ohneweiters erzeugt — ist in allen Fällen eine secundäre Erscheinung und stets das Resultat der Zurückwerfung einer fortschreitenden Bewegung der Molecüle, die erst durch Interferenz

mit einer entgegenkommenden gleichen Bewegung zur stehenden wird. Es ist nothwendig, uns diesen Vorgang recht klar zu machen, um von den später zu erörternden longitudinalen Wellenbewegungen, insbesondere von jenen der Luft in Röhren, dann von der Fortpflanzung des Schalles eine richtige Vorstellung zu erlangen.

Ich errege an diesem Seile eine fortschreitende Welle; ich versuche ihr bald darauf eine zweite in gleicher Richtung nachzusenden. Würde der richtige Zeitraum zwischen der ersten und zweiten Primitivbewegung getroffen, so gelingt der Versuch und Sie sehen momentan eine stehende Welle. Ich sende nun in kürzeren Zeiträumen eine Primitivbewegung der anderen nach und das Seil zeigt mehrere stehende Wellen von gleicher Länge auf dem Seile vertheilt. Wie entstehen diese? Diese Zeichnung (Fig. 36) wird Ihnen es leicht machen, den ganzen Werdeprocess zu erkennen.

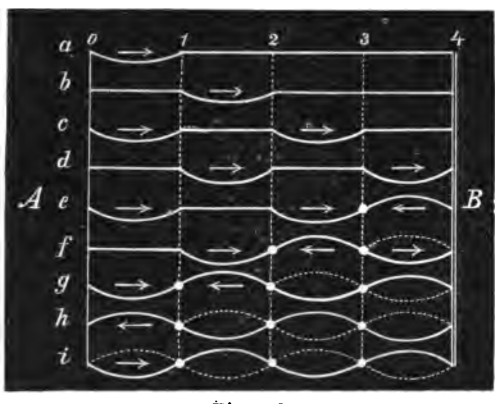


Fig. 36.

Wir erregen bei *a* zwischen 0 und 1 ein Wellenthal. Sobald dessen Vordertheil bei b^2 angekommen, senden wir bei c^0 ein neues Thal nach und so fort in gleichem Tempo. Ist der Wellenzug bei d^4 angekommen, so beginnt bei *e* die Reflexion. Thal wird Berg. Letzterer möchte fortschreiten, und um dieses zu können, den Punkt 3 heben; wogegen das ihm entgegenkommende neue Thal (zwischen 2 und 3 *e*), um weiterschreiten zu können, denselben Punkt herabzuziehen bestrebt ist. Hier stossen die Kräfte aufeinander, sie interferiren, und es ist dieser Punkt als eine feste Abgrenzung anzusehen, innerhalb welcher sich die stehende Welle (*f*) zwischen 3 und 4 bildet. Bei *g* stösst das Thal bereits auf 3 als einen festen Widerstand und verkehrt sich daher bei *h* in den Berg, kann aber wegen des ihm entgegenkommenden Thales 2 auch nicht weiter schreiten, erfährt die Interferenz und bildet zwischen 2 und 3 die stehende Welle. Im gleichartigen Verfolge dieses rückschreitenden

Interferenzprocesses wird endlich auch *i* zum festen Punkte, und das ganze Seil ist in vier stehende gleiche Wellen zerlegt, die der Gesammtlänge zweier fortschreitender Wellen entsprechen.

Um nun den Vorgang, den wir uns bis jetzt als in der Bewegung begriffen denken mussten, auch in wirklicher Bewegung zu erblicken, nämlich, wie zufolge der Interferenz gegenseitiger Kräfte der Verlauf der einzelnen Phasen sich gestaltet, durch deren Zusammenwirken die Bildung stehender Wellen erfolgt, wird uns die, Ihnen vom vorigen Vortrage erinnerliche, in Figur 26 dargestellte Vorrichtung dienlich sein.



Fig. 37 *a*.

Ein mit dem Berge voranschreitender Wellenzug (Fig. 37 *a*) trifft auf das dichtere Medium (*A*). Der Vordertheil, gleich $^1/_4$ Welle,

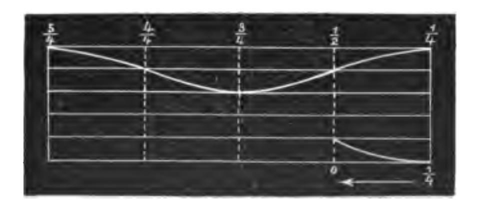


Fig. 37 *b*.

Resultat.

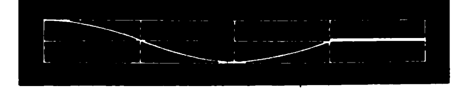


Fig. 37 *c*.

wird reflectirt und dadurch zum Vordertheile des Thales (Fig. 37 *b*). Da hier entgegengesetzte Phasen aufeinander treffen, so wird die Bewegung o sein (Fig. 37 *c*). Nun gelangt der Rücktheil des Berges zur Reflexion (Fig. 37 *d*), er wird Rücktheil des Thales und macht das reflectirte Wellenthal vollständig. Dieses trifft mit dem fort-

schreitenden Wellenthal zusammen und hier summiren sich also die Kräfte (Fig. 37 *e*). Die nächste Phase bringt das Vordertheil

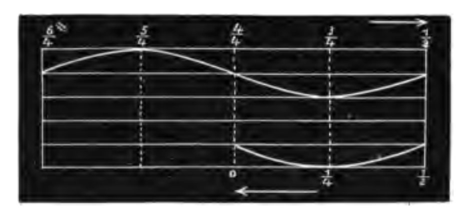


Fig. 37 *d*.

Resultat.

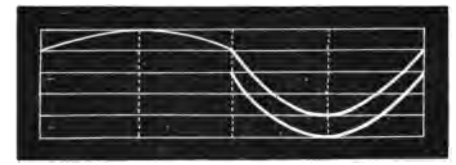


Fig. 37 *e*.

des fortschreitenden Wellenthales zur Reflexion, sie wird zum Rücktheile des Berges (Fig. 37 *f*). Die Interferenz tritt nun bei dieser,

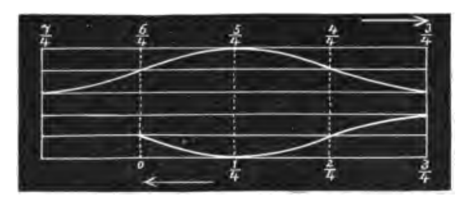


Fig. 37 *f*.

Resultat.



Fig. 37 *g*.

aber auch bei den beiden vorangegangenen Phasen ein, die Kräfte heben sich auf (Fig. 37 *g*).

Endlich reflectirt der Rücktheil des fortschreitenden Wellenthales (Fig. 37 *h*); es treffen jetzt alle Phasen zusammen und verstärken sich (Fig. 37 *i*). Die stehende Welle ist fertig und wird durch die nachfolgenden Wellenzüge und deren Reflexion in ihrer Bewegung erhalten. — Aus dieser Darstellung wird zugleich begreiflich, dass stehende Wellen durch Reflexion vom dichteren Medium[1]) nur dann entstehen können, wenn ihre Phasen in Ab-

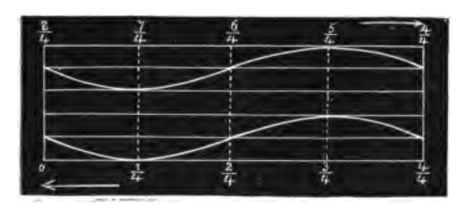


Fig. 37 *h*.

Resultat.

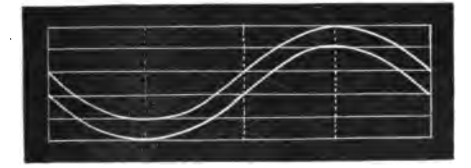


Fig. 37 *i*.

ständen zusammentreffen, die ein gerades Vielfaches einer $^1/_4$ Wellenlänge, also gleich $^1/_2$, 1, $1^1/_2$, 2, u. s. w. der ganzen Wellenlänge bilden.

Wie nun stehende Wellen durch schwingende Körper selbst eingeleitet und erhalten werden, zeigt uns ein vom Prof. Melde (an der Universität in Marburg) ersonnener Apparat, der auch noch später, wenn wir zur Betrachtung der Schwingungen gespannter Drähte gelangen werden, Dienste leisten wird. Die Vorrichtung (Fig. 38) besteht in zwei Leisten, deren eine, *c*, um die Axe *a* drehbar ist. An der Leiste *b*, welche, wie die meisten unserer Apparate, mit einer Schraubzwinge versehen ist, um mit der Tischplatte verbunden werden zu können,

---

[1]) Auf die Darstellung jener Interferenzerscheinungen, die erfolgen, wenn die Welle von einem minder dichten Medium reflectirt wird, kann erst bei den Schwingungen der Luftsäulen eingegangen werden.

befindet sich ein am unteren Ende befestigter Eisenstab, der elektromagnetisch in Schwingungen versetzt und erhalten wird. Am freien Ende des Stabes und an der Schraube *d* wird ein weisser Faden befestigt, den man mittelst der Schraube beliebig spannen kann. Durch zu- und abnehmende Spannung wird bewirkt, dass sich der Faden in eine geringere oder grössere Zahl schwingender Abtheilungen zerlegt. Zugleich liefert dieser Apparat eines der vielen Beispiele der wichtigen Rolle, welche dem Elektromagnetismus in der Akustik zukommt, denn es gibt kein geeigneteres Mittel, Saiten, Stäbe, Membranen gleichmässig und dauernd in Schwingung zu erhalten, als die elektromagnetische Anziehung, deren Vorgang Ihnen demnächst ausführlich zu erklären, ich mir vorbehalte.

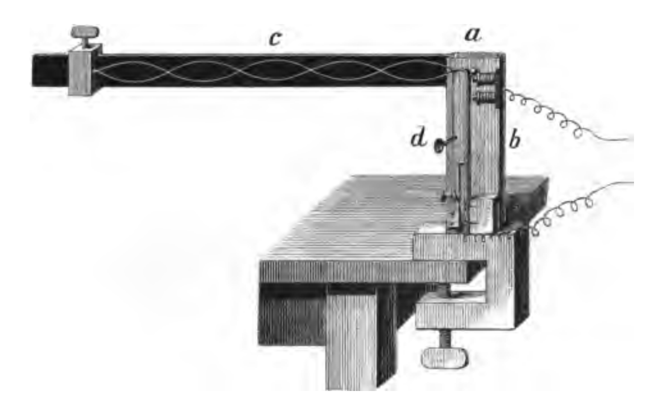


Fig. 38.

Bei der Stellung des Apparates, welche die Zeichnung zeigt, wird die Wellenbildung durch Zug bewirkt, weil sich die Strecke des Fadens verkürzt, wenn er die Bauchform annimmt. Wird durch senkrechte Stellung der Leiste *c* der Faden in die axiale Richtung zum schwingenden Stabe gebracht, so entstehen die Wellen durch seitlichen Stoss. —

Alle bisher betrachteten Wellenformen, sowohl die stehenden als die fortschreitenden, nennt man transversale (querschwingende), weil alle Theilchen ihre Oscillationen immer senkrecht zur Ruhelage ausführen, sei es gleichzeitig, wie in der stehenden, oder progressiv, wie in der fortschreitenden Welle.

Dieser Querschwingung der Theilchen entgegengesetzt ist die Längsschwingung, die sogenannte Longitudinalbewegung, welche zum Theile ganz andere Erscheinungen darbietet als die Transversalbewegung.

Führen wir auf das Ende eines Stabes in der Längsrichtung einen Schlag, so werden wir einen Schall erregen, was offenbar den Schluss gestattet, dass in diesem Stabe eine Wellenbewegung stattgefunden hat. Dass eine solche Bewegung stattfinden kann, wissen wir von der Lehre der Molecularbewegung her, denn es ist Ihnen erinnerlich, dass die Molecule innerhalb enger Grenzen pendelartige Schwingungen um ihre Ruhelage ausführen können. Eine zutreffende Vorstellung des hierbei stattfindenden Vorganges wird sich aus folgender Betrachtung ergeben.

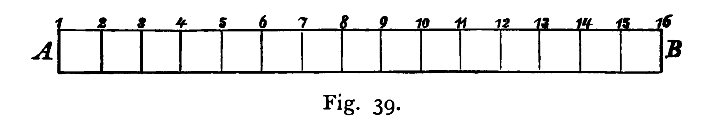


Fig. 39.

Denken wir uns eine Röhre und eine Zahl von — sagen wir — 16, in derselben in gleichen Abständen vertheilten, passenden, leicht verschieblichen Scheibchen (Fig. 39). Zwischen je zwei solchen Scheibchen befinde sich eine sehr elastische, mit den Scheibchen verbundene Masse von durchaus gleicher Beschaffenheit. Die Scheibchen stellen Querschnitte der Molecularschichten, die elastische Masse die Oscillationsgrenzen der einzelnen Molecule vor, innerhalb deren sich dieselben zusammendrücken und ausdehnen lassen und dadurch jene Eigenschaft bethätigen, die sie besitzen müssen, um Theile eines elastischen Körpers sein zu können.

Um unsere Vorstellung mit dem wirklichen Vorgange in allen Punkten congruent zu machen, müssen wir uns endlich denken, dass die Röhre selbst alle sogleich zu schildernden Bewegungen der Scheibchen und des sie verbindenden elastischen Mittels mitmacht; ja noch präciser gesagt, dass Röhre, Scheibchen und das elastische Mittel aus genau einem und demselben Stoffe bestehen.

Wenn nun durch einen Stoss auf das Scheibchen 1 dasselbe in die Richtung gegen *B* gedrängt wird, so wird die zwischen 1 und 2 befindliche elastische Masse zusammengedrückt werden. Es entsteht

eine Verdichtung, der das Scheibchen 2 nothwendig weichen muss. Diese Verdichtung überträgt sich auf 3, 4 u. s. w., kurz sie pflanzt sich durch alle Scheibchen bis zum letzten (16) fort, welches offenbar auch aus seiner Ruhelage verdrängt wird, demgemäss wir folgern müssen, dass sich hier der Stab oder die Röhre einen Moment lang um soviel verlängern wird, als die Oscillation der Molecularschichte 16 über *B* hinaus beträgt, und deren Amplitude von der Stärke des Primitivstosses abhängt.

Während aber das erste Scheibchen das zweite aus seiner Lage verdrängt, kann es selbst nicht an der Stelle des zweiten verbleiben, es muss in seine Lage *A* und noch etwas darüber zurückschwingen,

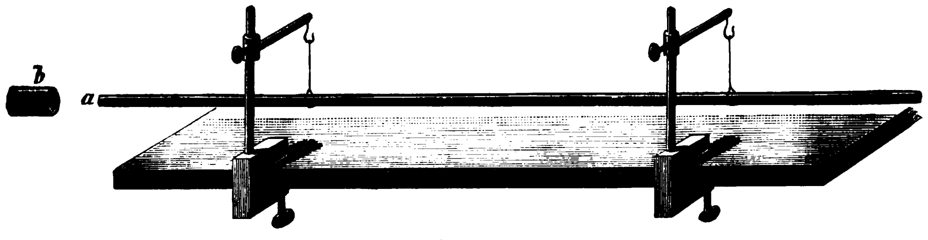


Fig. 40.

sowohl wegen des Rückstosses der Verdichtung, wie wegen der elastischen Beschaffenheit der Theilchen überhaupt, die keinem aus seiner Ruhelage gebrachten Molecule gestattet, in der neuen Lage zu verbleiben.

Da das zwischen den Scheibchen lagernde, elastische Mittel mit den Scheibchen verbunden gedacht werden muss, daher die Bewegung derselben mitmacht, so wird dieses Mittel beim Zurückschwingen des Scheibchens 1 von demselben mitgezogen, während es, mit dem zweiten Scheibchen ebenfalls verbunden, auch diesem in seiner entgegengesetzten Bewegung gegen das Scheibchen 3 folgen muss. Und so ist, während sich 2 gegen *B* bewegt, 1 schon auf dem Rückwege nach *A* begriffen. Zwischen 1 und 2 entsteht dadurch ein grösserer Raum, als er ursprünglich war, und in Folge dieser Raumvergrösserung erleidet das dazwischen befindliche Medium eine gleichzeitig nach entgegengesetzten Seiten erfolgende Dehnung, folglich eine Verdünnung der moleculären Schichten.

Dass diese Bewegungsart thatsächlich in der geschilderten Weise vor sich geht, lässt sich mehrfach durch Experimente nachweisen.

Ich führe gegen diesen Eisenstab, welcher am Ende des ersten und dritten Viertels seiner Länge an je einem Bindfaden aufgehängt ist (Fig. 40), in der Längsrichtung einen Schlag. Sie hören einen bestimmten Ton und werden ihn, ohne dass ein neuer Schlag erfolgt, nochmals hören, wenn ich das Stabende alsbald mit einer auf denselben Ton abgestimmten, kleinen, einseitig geschlossenen Resonanzröhre aus Pappe oder Holz in Berührung bringe, — ein Beweis, dass der Stab in der Längsrichtung Schwingungen vollführt, die in Dehnungen und Zusammenziehungen bestehen, ein Vorgang, welchen Ihnen diese Drahtspirale (Fig. 41) in allerdings einseitiger und übertriebener Weise, versinnlicht, wenn man das Gewichtchen abwärts zieht und es dann sich selbst überlässt.

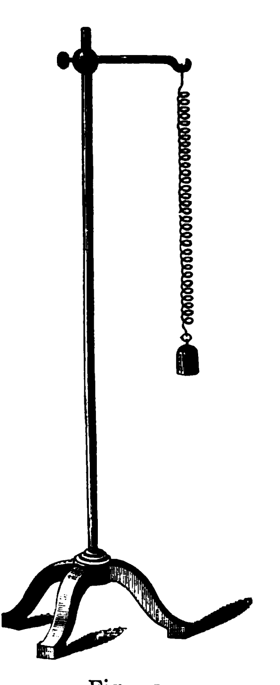


Fig. 41.

Durch den, auf das Stabende axial geführten Schlag des Hammers werden zugleich auch transversale Schwingungen erregt. Man überzeugt sich hievon durch die Vergleichung des Klanges mit jenem, der durch einen senkrecht auf den Stab geführten Schlag entsteht.

Ob aber durch letzteren der Longitudinalton hervorgerufen wird, lässt sich durch Versuche mit unserer Resonanzröhre nicht nachweisen.

Um den Longitudinalton ohne Beimischung transversaler Schwingungen rein zu erhalten, bedient man sich der Reibung, was in der Weise geschieht, dass man den Stab in gleichen Abständen, wie zuvor in Figur 40, befestigt und zwischen diesen Befestigungen der Länge nach mit einem, mit Colophonium bestaubten Lederstücke reibt. Bringt man ein leichtes Kugelpendel mit einem Ende des Stabes in Berührung, so wird, sobald der Stab tönt, die Kugel, je nach der Stärke des erregten Klanges, mehr oder minder heftig fortgeschleudert werden (Fig. 42). Dieser Versuch belehrt uns zugleich

in überzeugender Weise, dass ein Körper, longitudinal erregt, sich abwechselnd verlängert und verkürzt. Wäre dieses nicht der Fall, so würde die an das Stabende gelehnte Kugel beim Erklingen des Reibungstones unbewegt bleiben.

Ein Schlag auf das Stabende würde die Kugel ebenfalls fortschleudern; dabei spielt aber zugleich die Fortpflanzung des Stosses mit, während das Reiben die Verlängerungswirkung rein darstellt.

Dass longitudinale Schwingungen, ebenso wie die transversalen, sowohl fortschreitende als auch stehende werden können, leuchtet ein. Bei den fortschreitenden wird an jeder Stelle progressiv eine Verdichtung stattfinden. Durch Wiederholung der Primitivimpulse

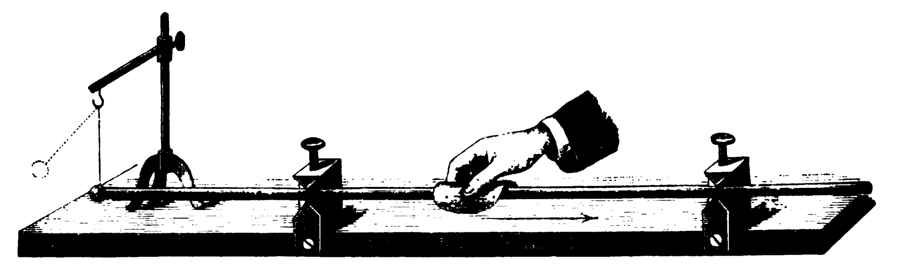


Fig. 42.

können aber infolge Interferenz mit den reflectirten Wellen stehende Schwingungen sich ausbilden. In diesem Falle werden die Verdichtungen und Verdünnungen nicht an jeder Stelle, sondern nur an bestimmten Punkten stattfinden, Vorgänge, die wir in der Folge näher zu betrachten haben werden, und welche analog sind der Bildung transversaler, stehender Wellen, die ebenfalls nur an bestimmten Stellen erfolgt.

Ich wünsche lebhaft, Ihnen die Vorgänge der Longitudinalschwingungen so anschaulich als möglich gemacht zu haben, denn je zutreffender die Vorstellung ist, die Sie von diesen Vorgängen gewinnen, um so leichter werden Sie alle Erscheinungen begreifen, denen diese Bewegungsart zu Grunde liegt. —

Es wird Sie befremden, wenn ich sage, dass die Longitudinalschwingungen der Körper, die luftförmigen ausgenommen, in der Musik fast gar keine Anwendung finden, und dass trotzdem gerade diese Bewegungsart ausschliesslich diejenige ist, die es möglich macht, und daher unentbehrlich ist, um den Schall, in welcher Weise immer er hervorgerufen wurde, bis zu unserem Ohr zu leiten.

Schwingungen, welche Schall erzeugen, müssen stehende sein, mögen sie transversal oder longitudinal erfolgen. Schwingungen dagegen, welche den Schall zu unserem Ohre leiten, können nur fortschreitende und zwar nur longitudinale sein.

Da kein Körper, der überhaupt fähig ist, Töne zu liefern, von selbst ertönt, sondern durch irgend eine entsprechende Erregungsart erst zum Tönen gebracht werden muss, so werden vom Erregungspunkte zunächst fortschreitende Wellen ausgehen, die sich jedoch, an den Grenzen des Körpers reflectirt, beim Begegnen neuer fortschreitender Wellen in stehende umsetzen.

Die Wahrnehmung solcher Schwingungen als Töne setzt aber voraus, einmal, dass wir die Schwingungen zu hören bekommen, und dann, dass wir sie zu hören vermögen; denn ist letzteres nicht der Fall — wie bei Tauben — die nur die Erschütterung der Schwingungen fühlen und letztere auch sehen können — so vermögen wir vom Schalle keine Vorstellung zu erlangen, er würde für uns nicht existiren, weil er als solcher nur auf unser Gehör eine Wirkung zu äussern vermag und sonst keine.

Damit wir aber die Töne zu hören bekommen, müssen die Schwingungsbewegungen des tönenden Körpers nach unserem Gehörorgane übermittelt werden. Dies geschieht in den weitaus meisten Fällen durch die atmosphärische Luft, jenes elastische Medium, das die Körperwelt auf der Erde umgibt.

Der schwingende Körper erschüttert die ihn umgebende Luft, und, gleichwie das auf die Wasserfläche fallende Steinchen auf dieser immer weitere Wellenkreise zieht, breiten sich die vom schwingenden Körper comprimirten Luftschichten als Verdichtungs- und Verdünnungssphären fortschreitend immer weiter aus, bis sie an unser Ohr gelangen, an dessen Trommelfell schlagen und dieses in stehende Schwingungen versetzen, die genau in dem Zeitmasse erfolgen, in welchem der Körper schwingt, von dem die tönenden Erschütterungen ausgehen, und in welchem die dadurch erzeugten Luftverdichtungen aufeinander folgen.

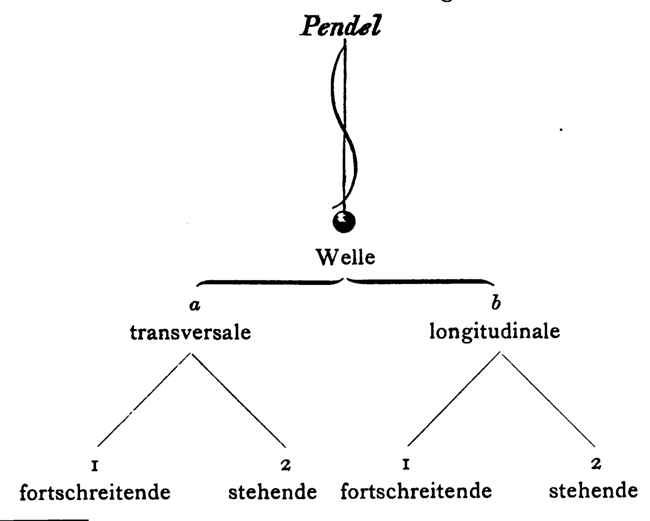
Es beruht mithin jede objective Gehörswahrnehmung nothwendig auf stets in derselben Ordnung einander folgenden Bewegungen dreier Körper und zwar: eines Körpers, von welchem Schwingungen ausgehen, eines Körpers, der diese Schwingungen empfängt, und dazwischen eines Körpers, der die Schwingungen von dem ersten auf

den zweiten überträgt. Die den specifischen Functionen dieser drei Körper entsprechenden Wellenformen werden also zunächst die, vom schwingenden Körper ausgehenden, stehenden Wellen sein, entstanden durch Interferenz fortschreitender und reflectirter Wellen; diese stehenden Wellen werden vom vermittelnden Körper (sei dieser die Luft oder ein anderes elastisches Medium) nur in Form fortschreitender (Verdichtungs- und Verdünnungs-) Wellen fortgeleitet, welche im empfangenden Körper, dem Ohre, endlich wieder dadurch zu stehenden Wellen werden, dass sie die Gehörsmembrane, das Trommelfell, in Schwingungen versetzen, die in dem Tempo der Verdichtungs- und Verdünnungswellen abwechselnd nach Innen und nach Aussen erfolgen.[1]) Das Schema wird also in aller Kürze lauten: schwingende Körper — stehende Wellen; leitendes Medium — fortschreitende Wellen; Ohr — stehende Wellen.

Wir sind am Schlusse der Lehre von der Wellenbewegung angelangt und wollen das Vorgenommene nur noch kurz recapituliren.

Wir lernten vier Arten der Wellenbewegungen kennen und erkannten bei eingehender Betrachtung einer jeden derselben, dass sie alle das Pendelgesetz befolgen, ja dass sie insgesammt nur verschiedene Erscheinungen einer und derselben Bewegungsart sind.

Hier der schematische Zusammenhang:



[1]) In dem Abschnitte »Das Ohr« wird hierüber Näheres ausgeführt werden.

Uns dieses Schema nach allen Richtungen anschaulich zu machen, bietet die vom Prof. Mach (derzeit an der deutschen Universität in Prag) ersonnene Wellenmaschine ein ausgezeichnetes Versinnlichungsmittel dar. Der Apparat besteht der Hauptsache nach aus zwei parallelen, wagrechten Leisten *A*, *B*, deren eine (*A*) an einem

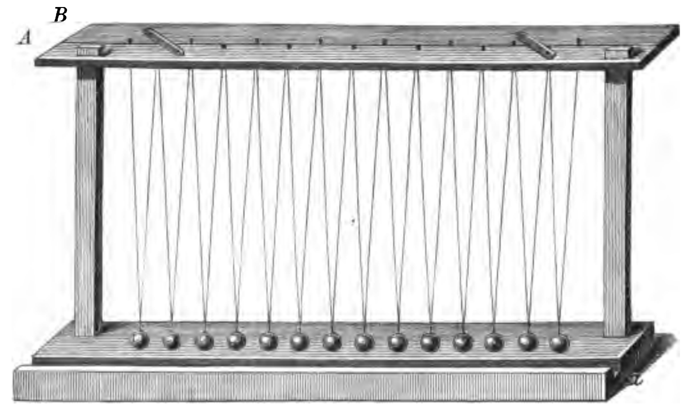


Fig. 43.

Gestelle befestigt, während die andere (*B*) mit der ersten mittels zweier Gelenktheile verbunden ist, wodurch sie aus der Stellung Figur 43 in jene von Figur 44 übergeführt werden kann. Die Kugeln (in beliebiger Zahl) werden mit je zwei Fäden an der Innenkante der Leisten derart befestigt, dass, wenn die Leisten geöffnet sind, die Fadenlinien

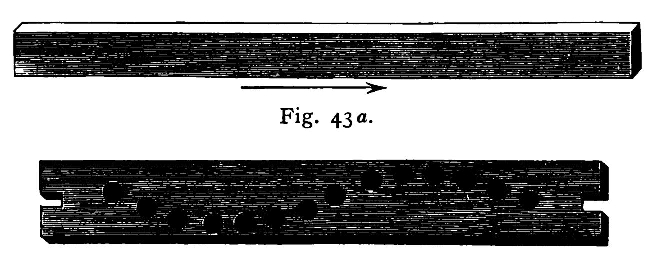


Fig. 43*a*.

Fig. 43*b*.

zusammenfallen. Die Kugeln müssen von gleicher Grösse sein und in gleichen Abständen gleich tief hängen. Ausserdem werden benöthigt: zu Figur 43 eine glatte, an den Kugeln genau vorbeigleitende Holzschiene (Fig. 43 *a*) und eine in Wellenform geschnittene Schiene (Fig. 43 *b*), in welche in, mit den Kugeln übereinstimmenden Abständen

Löcher von etwas kleinerem Durchmesser, als jenem der Kugeln, gebohrt sind; zu Figur 44 eine Schiene, die an einem Ende eine bis zur Hälfte der Kugeln reichende Erhöhung hat (Fig. 44 *a*), dann eine gerade, mit Löchern versehene Schiene, welche Löcher in zweimal (oder mehrmal) zunehmend aneinander- und wieder auseinandergehenden Abständen angebracht sind, wie aus der Zeichnung (Fig. 44 *b*) ersichtlich.

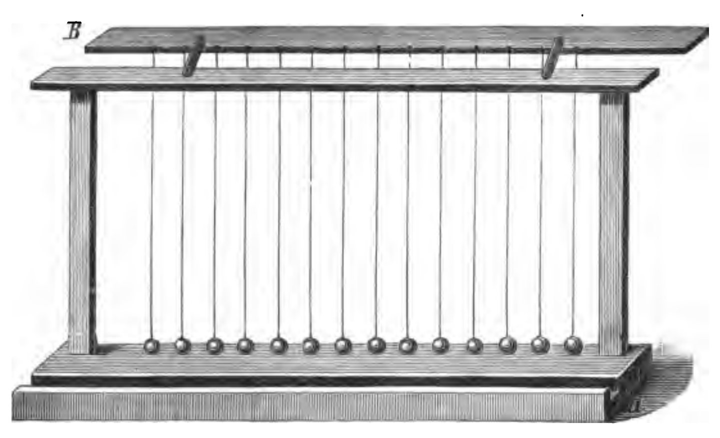


Fig. 44.

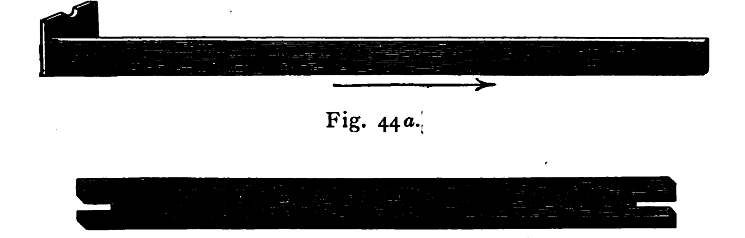


Fig. 44 *a*.

Fig. 44 *b*.

Dieser Apparat nun gestattet, auf die einfachste Art darzustellen, und zwar:

α) Bei geschlossenen Leisten (Fig. 43).

1. Fortschreitende Transversalwellen, als deren Repräsentanten die Wasser- und die Seilwellen gelten können.

(Die Schiene (Fig. 43 *a*) wird derart in die Rinne *a* eingelegt, dass die Kugeln sich von vorne an die Schiene lehnen, die hierauf in der Pfeilrichtung abgezogen wird.)

2. Stehende Transversalwellen, deren Typus zwischen festen Grenzen senkrecht auf der Ruhelage hin- und herschwingende Seilwellen, Saiten, Stäbe, Platten und Membranen sind, und die sich in Abtheilungen zerlegen lassen.

(Die Schiene (Fig. 43 *b*) wird gehoben und, nachdem die Kugeln in die darunter stehenden Löcher gebracht sind, rasch gesenkt.)

β) Bei geöffneten Leisten (Fig. 44).

1. Fortschreitende Longitudinalwellen, durch einen einmaligen Stoss auf das Ende eines Stabes, einer Röhre, überhaupt durch eine einmalige explosive Erschütterung der Luft erzeugte, von einem Centrum nach jeder Richtung hin sich ausbreitende Verdichtungs- und Verdünnungssphären. (Die Schiene (Fig. 44 *a*) wird in die Rinne *a* gebracht und in der Pfeilrichtung abgezogen.) Dieselben lassen sich durch langsames Schliessen der Leisten in fortschreitende Transversalwellen überführen, wodurch dargethan wird, dass die Verdichtungen und Verdünnungen ebenso abwechseln wie Wellenberg und Thal, endlich

2. Stehende Longitudinalwellen, deren Hauptrepräsentanten die Schwingungen abgegrenzter Luftmassen und geriebener Stäbe sind. Man verfährt mit der Schiene Figur 44 *b*, wie mit jener in Figur 43 *b*. Diese Wellenform lässt sich ebenfalls und zwar durch langsames Schliessen der Leisten AB in die stehende Transversalwelle überführen, wie sich denn auch aus den Wellenformen α 1 und α 2 durch Oeffnen der Leisten AB (Fig. 43 und 44) die Formen β 1 und β 2 herstellen lassen.

Und so haben wir alle Arten von Bewegungen kennen gelernt, welche erfolgen müssen, um Schall zu erzeugen und ihn behufs seiner Wahrnehmung bis an unser Ohr zu bringen. — Die Arten des Schalles und die Körper nunmehr kennen zu lernen, die geeignet sind, Schall zu erzeugen, die Art, wie er in diesen Körpern hervorgerufen wird, wie er sich verbreitet, und welche Zeit er dazu benöthigt, wird unsere nächste Aufgabe bilden.

---

5. Vortrag.

(Der Schall. — Dessen Entstehung und Arten.)

Was wir nicht hören, existirt für uns nicht als Schall. Um einen Gehörseindruck zu empfangen, müssen zunächst Erschütterungen unseres Trommelfelles erfolgen, die durch das Zusammenwirken des, im Innern unseres Ohres fungirenden Fortpflanzungsapparates zu den Gehörsnerven geleitet und durch diese endlich zu unserem Bewusstsein gebracht werden. Die ausführlichste Betrachtung der hierbei im Ohre stattfindenden Vorgänge wird in den, diesem Organe speciell gewidmeten Vorträgen folgen.

Erschütterungen, die wir als Schall — sei es Geräusch, Klang oder Ton — empfinden sollen, müssen von aussen her zu unserem Ohre gelangen, sie müssen von einer ausser uns befindlichen Schallquelle herrühren, sie müssen objectiv sein. Blos subjective Schallempfindungen, d. h. solche, die in uns entstehen und für sonst Niemanden existiren, wie das sogenannte Klingen im Ohr, das Ohrensausen u. dgl., sind pathologische Erscheinungen, mit denen die Akustik nichts zu schaffen hat. Sie gehören, gleichwie die Idiosynkrasie gegen gewisse Töne und Klangfarben oder das Doppelthören — in den Bereich des Arztes.

Wir wissen aus Beobachtungen, dass periodische, d. h. gleichmässig aufeinanderfolgende, also pendelartige Bewegungen, die in einer gewissen Zeit sich in hinreichender Zahl wiederholen, Schall erzeugen.

Die Erfahrung lehrt uns aber nicht minder, dass es auch eine Menge Arten von Bewegungen gibt, die nicht periodische sind, sich nicht in bestimmter Zeit wiederholen, ja manchmal blos ein einziges Mal erfolgen und dennoch ebenfalls als Schall empfunden werden.

Wir müssen also zunächst für bestimmte Arten von Schall bestimmte Bezeichnungen feststellen. Der Reichthum der deutschen Sprache an bezeichnenden Ausdrücken macht dies leicht. Auf grössere Schwierigkeiten werden wir dagegen stossen, wenn wir versuchen, Grenzen zwischen den verschiedenen Arten des Schalles zu ziehen.

Bezeichnen wir mit Schall alles Hörbare, so wird sich uns an wesentlichen Untersuchungsmerkmalen einmal seine Messbarkeit nach Höhe und Tiefe, und dann seine Unterscheidbarkeit von anderen gleich hohen Schallen darbieten.

Ziehen wir also zuerst die Messbarkeit in Betracht und beginnen mit den mindest messbaren Schallen. Dieselben können kurz, dauerlos oder anhaltend sein, aus einzelnen gleichartigen, oder aus verschiedenartigen, gleichzeitigen Impulsen entstehen. Alle Gehörseindrücke, die wir aus derartigen Schallquellen empfangen, pflegen wir als Geräusch zu bezeichnen. Dahin gehört an dauerlosen Schallen: Schlag, Knall, Stoss, Fall; zu Dauerschallen zählt: das Kritzeln, Kratzen, Knarren, Schleifen, Zischen, Schnarren, Rasseln, Klirren; das Rollen des Donners, das Rauschen des Wasserfalles, das Brausen der Meeresbrandung, das Sausen des Windes durch Bäume, Schlotte und Spalten, das Zerreissen eines Stückes Papier oder Leinwand, das Zerbrechen eines dürren Astes, das Klappern des Mühlrades, das Schütten des Regens, Hagels, das Schütteln eines Behälters mit Nägeln, Schrotten etc., das Rücken von Stühlen, das Applaudiren, das Geplauder in Gesellschaften, auf Bällen, im Theater während der Zwischenacte, das tausendfältige Lautgemenge, das wir Tagesgeräusch nennen, und unzähliges Andere. Hieher gehören aber auch Geräusche, die aus dem regellosen Beisammensein solcher Impulse entstehen, die entweder messbare Laute begleiten, oder es sogar selbst sind, so im ersten Falle beispielsweise das Kratzen des Bogens beim Anstreichen der Saite; im anderen Falle das gleichzeitige Erklingen nicht zusammengehöriger Töne, etwa durch Hintappen auf die Claviertasten in tiefer Lage mit beiden Händen, das Stimmen des Orchesters u. dgl.

Ich liefere Ihnen ein hieher gehöriges Beispiel, indem ich alle Töne dieses mehrere Octaven umfassenden Harmoniums zugleich erklingen mache.

Dass in dem verschiedenartigsten Geräusch, und nicht nur in den letztgenannten, sondern in den weitaus meisten Fällen messbare, d. h. musikalisch bestimmbare Laute enthalten sind, kann bei Anwendung geeigneter Mittel, ja vielfach auch ohne diese bei einiger Aufmerksamkeit wahrgenommen werden.

Ich kann Ihnen aus meinen Erfahrungen ein Beispiel anführen. Ich hatte im Herbste 1885 die Stimmgabeln von 103 Regimentsmusiken zu vergleichen. Um die Schwingungen länger zu hören, bediente ich mich eines auf a^1 abgestimmten Resonators. Beim Abklingen der Gabeln störten mich oft gellende a^1s, die

zeitweilig plötzlich im Resonator laut wurden. Sie kamen, da ich die Fenster meist offen hatte, von den im Tagesgeräusche vorgekommenen gleichen Tönen her, wie sie aus unseren Schulzimmern, von Kirchenglocken, von Drehorgeln u. s. w. herrührten, und die mit sonstigen Geräuschen von Wägen, Reitern u. dgl. zu einem für das unbewaffnete Ohr unentwirrbaren Chaos zusammenfliessen. Ueberzeugen Sie sich selbst, wie man aus einem Chaos von Tönen die einzelnen Töne gleichsam herausfischt. Ich vertheile unter Ihnen Resonatoren [1]) von verschiedener Tonhöhe und werde nun

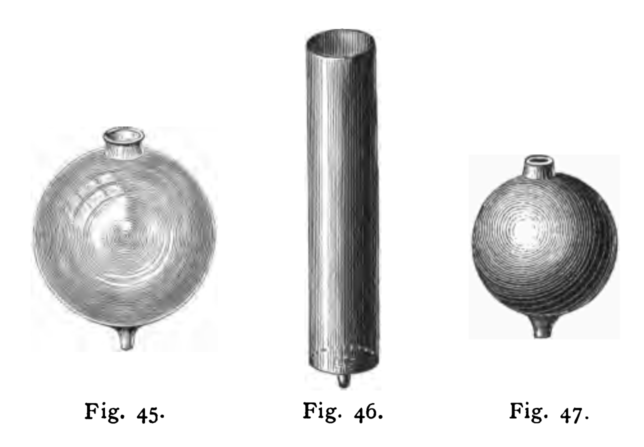


Fig. 45. Fig. 46. Fig. 47.

die chromatische Scala auf unserem Zungeninstrumente (ein kleines Harmonium mit zu Tage liegenden Tönen) spielen. Geben Sie das Hörrohr in den Gehörgang eines Ohres, das andere verschliessen Sie fest mit einem Finger. Wenn Sie nun einen recht lauten Ton vernehmen, rufen Sie »Halt!« Wir werden dann den Eigenton Ihres Resonators hervorrufen, indem wir entweder über seine Mündung hinweg einen Luftstrahl senden oder mit dem Finger leise an seine

---

[1]) Resonatoren, von Helmholtz erfunden, sind für beliebige Tonhöhen abgestimmte, in Form von Kugeln oder Röhren (Fig. 45, 46, 47) aus Glas oder Metall, ja selbst aus Pappe hergestellte, mit zwei Oeffnungen versehene Hohlräume, welche ihren Eigenton, wenn derselbe im Luftraume vorhanden ist, vermöge der Resonanz ungemein verstärken, gegen andere Töne aber unempfindlicher sind. Führt man die schmale Oeffnung des Resonators in den Gehörgang und verschliesst das andere Ohr mit dem Finger oder mit einem Wachspfropfen, so wird man den Eigenton des Resonators mit der geringsten Bewegung der Füsse, bei leisem Trommeln mit den Fingern auf einen Tisch u. dgl. wecken, ja ihn ohne alles Hinzuthun blos in Folge des Tagesgeräusches vernehmen.

Wand klopfen, und Sie werden finden, dass er genau mit jenem Tone des Instrumentes übereinstimmt, bei welchem Sie »Halt« riefen.

Wir wollen jetzt unser früheres Tongemisch wieder herstellen und Sie werden die Töne Ihrer Resonatoren sehr deutlich heraushören. Uebrigens ist zu einem solchen »Heraushören« nicht einmal ein Gemische musikalischer Klänge erforderlich; Ihr mit dem Resonator bewaffnetes Ohr wird aus jeder Art Geräusch — aus dem Schlag auf den Tisch, auf ein Brett, aus unserem Schritte durch das Zimmer, aus dem Klopfen gegen die Wand, aus einem Säge- oder Feilstrich — den Ton Ihres Resonators hören.

Zu dem früher erwähnten Satze, dass Geräusch auch aus dem Beisammensein musikalischer Klänge entstehen kann, will ich Ihnen noch einen Beleg liefern, der, da Sie jetzt aufmerksam sind, freilich nicht die Wirkung der Ueberraschung üben wird, und wobei eine Bewaffnung des Ohres nicht erforderlich ist, um die musikalischen Bestandtheile des Schallgemenges zu erkennen.

Ich habe hier acht Brettchen von gleicher Länge und Breite, aber ungleicher Dicke. Ich werfe eines derselben auf die Tischplatte, es wird Geräusch bilden; ich werfe die übrigen nach — ebenfalls nur ein Geräusch. Jetzt lasse ich sie aber einzeln nach einer bestimmten Ordnung fallen und Sie werden eine vollständige diatonische Tonleiter vernehmen.

Bei dauerlosem Schalle bedarf es einer Bewaffnung des Ohres nicht; etwas concentrirtere Aufmerksamkeit reicht hin, um in den meisten Fällen eine bestimmte Tonhöhe zu erkennen. Ich erinnere beispielsweise an die Töne, welche, auf eine ruhige Wasserfläche fallende Tropfen erzeugen. Ein weiteres Beispiel will ich Ihnen vorführen.



Fig. 48.

Ich werde mit dieser Glasröhre (Fig. 48) durch Luftcompression einen Knall hervorbringen, indem ich ein Ende der Röhre mit einem Korkstöpsel verschliesse und mittels eines Kolben die zwischen ihm und dem Stöpsel befindliche Luft verdichte und dadurch den Kork forttreibe. Rufen wir nach erfolgtem Knall den Ton der Röhre

hervor, indem wir über deren Oeffnung hinwegblasen, so überzeugen wir uns, dass deren Tonhöhe mit jener des Knalles übereinstimmt. Wiederholen wir das Experiment; der Knall klang diesmal tiefer, der Raum zwischen Kork und Kolben ist länger geblieben.

Die Gesetze, auf welchen das Entstehen, wie die Höhe dieser Töne fussen, werden wir bald kennen lernen.

Der dauerlose Schall, in welchem, wie die soeben vorgenommenen Beispiele zeigten, Laut und Geräusch sich ziemlich die Wage halten, leitet über zu einer Art Schall, die in Bezug auf Messbarkeit näher dem Tone als dem Geräusche steht, ja eine grosse Menge unendlich fein abgestufter Töne und Intervalle umfasst, aber vom Geräusche noch immer ein erkleckliches Mass mit sich führt und nothwendig mit sich führen muss. Dieser Schall, obgleich auf der akustischen Stufenleiter gewöhnlich ziemlich unter dem Tone stehend, nimmt, vom culturgeschichtlichen Standpunkte betrachtet, unter allen Schallen den ersten Rang ein, denn ihm allein verdankt die Menschheit ihre gesammte intellectuelle Entwicklung; Alles, was sie geworden, ist sie durch ihn geworden, ohne ihn würde sie sich von der Thierwelt durch nichts unterscheiden. Es ist die Sprache.

Bei der gewöhnlichen Art zu sprechen bildet jede Silbe, zumal wenn sie vom Consonanten begleitet ist, einen dauerlosen Laut von häufig schwer bestimmbarer Tonhöhe. — Gesellt sich zum Sprachlaut der Rhythmus, wie in der gebundenen Rede, noch mehr bei leidenschaftlichem Erheben der Stimme in pathetischer Declamation, so nähert sich der Sprachlaut immer mehr dem messbaren Tone, und es ist nicht unwahrscheinlich, dass manche Melodie der Rhapsoden, Improvisatoren, Minstrels, Troubadours, Minne- und Meistersänger sich lediglich aus dem lebhaften Vortrage ihrer Poesien herausgebildet hat. Bewusster verschmelzen im Recitativ Wort und Ton. Letzterer wird dominirend im Gesang und streift endlich die Hülle des Sprachgeräusches vollständig in der Vocalisation ab.

Damit sind wir in den Bereich des völlig messbaren Schalles, des Musiktones, eingetreten.

Bevor wir hier nähere Umschau halten, sei einer kurzen Betrachtung über den zurückgelegten Weg Raum gegönnt.

Da jeder schallerzeugende Impuls nothwendig eine Schwingung voraussetzt, in einem aus vielfachen Schallarten, wie es z. B. das

Strassengeräusch ist, zusammengesetzten Lautgemische also eine ebenso grosse Menge der verschiedenartigsten Schwingungen vorkommen muss, wie sie eben den verschiedenen einzelnen Schallquellen nach Höhe und Stärke zukommen, und wobei ganz abgesehen werden soll von den Theilschwingungen, die wiederum jeden einzelnen dieser Schalle in grösserer oder geringerer Zahl begleiten — so gelangt man unschwer zu dem Schlusse, dass, mit je weniger zusammengesetzten Schwingungen wir es zu thun haben, wir in dem Masse die Region des Geräusches hinter uns lassen und jener des Klanges immer näher kommen.

Auf diesem Wege müssten wir endlich zur absolut einfachen Schwingung und damit zum absolut reinen Tone gelangen.

Wir werden in der Folge erfahren, dass ein absolut reiner Ton eigentlich nicht existirt und nur annähernd auf künstliche Art herzustellen ist, beispielsweise mittels einer Stimmgabel vor einer gleichgestimmten Resonanzröhre, zu welchem Experimente sich ein mit einem Gummiball communicirendes, ungefähr zur Hälfte mit Wasser gefülltes Glasrohr (Fig. 49) besonders eignet. Durch Wechsel des Wasserniveaus kann man den Ton der Gabel kommen und verschwinden machen. Man findet solcher Art leicht die der stärksten Resonanz entsprechende Wasserhöhe, beziehungsweise Rohrlänge.

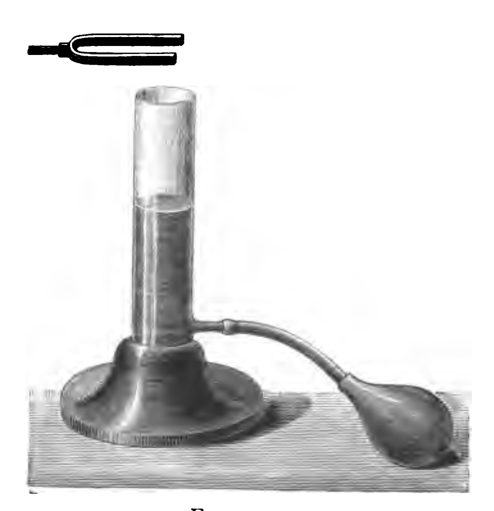


Fig. 49.

Auch der leise angeblasene Grundton tiefer, weit mensurirter, hochaufgeschnittener, gedeckter, hölzerner Orgelpfeifen gibt einen von Beimengungen anscheinend freien Klang. [1])

[1]) Hier werden verschiedene gedeckte Orgelpfeifen zum Tönen gebracht.

Solche Töne sind jedoch stumpf, weich, um nicht zu sagen charakterlos.

Im Allgemeinen hat jeder scheinbar noch so reine Ton zweierlei Begleiter, deren einen zu beseitigen durch die Art der Hervorrufung des Tones bis zu einem gewissen Grade möglich wird, während der Versuch, den anderen los zu werden, die Vernichtung des individuellen Gepräges des Klanges der betreffenden Tonquelle zur Folge haben würde. Der erstgenannte dieser Begleiter ist das Geräusch, welches mit der materiellen Tonerzeugung verbunden ist: so das Reibungsgeräusch bei mit dem Bogen gestrichenen oder das Klirren gestossener, das Klimpern gezupfter Saiten, das Blasegeräusch bei Orgelpfeifen und Blasinstrumenten, namentlich bei Flöten.[1])

Der Einfluss organischer Formation oder individueller Angewöhnung bei Hervorbringung der Töne der menschlichen Stimme gehört ebenfalls hieher.

Den zweiten Begleiter fast aller Töne bilden die zur Charakterisirung unentbehrlichen Partial-(Theil-)schwingungen desselben Körpers, die wir später eingehend werden kennen lernen, und durch welche die sogenannten Theil- oder Obertöne entstehen.

Von der Zahl, Ordnung und Stärke dieser Theiltöne hängt fast ausschliesslich dasjenige ab, was wir mit Klangfarbe bezeichnen, jenes, man möchte sagen: persönliche Gepräge der Klänge, wodurch wir allein in den Stand gesetzt werden, den gleichen Ton verschiedener Tonquellen genau zu unterscheiden, und so den Klang verschiedener Instrumente zu erkennen.

Die Theorie, der zufolge die Klangfarbe das Product mitklingender Theiltöne des betreffenden Klanges ist, hat Helmholtz zum Urheber.[2]) Diesem berühmten Gelehrten verdanken wir damit die Aufhellung eines Gebietes, das bis dahin zu den dunkelsten der Akustik gehörte, und in welches tiefer einzudringen uns erst später möglich sein wird, wenn wir uns über das Wesen der Partialschwingungen überhaupt orientirt haben werden. —

Wir haben die ganze Aufeinanderfolge der Schallerscheinungen, vom klanglosesten Geräusche bis zum darstellbar einfachsten mess-

---

[1]) Auch hier wird mit engmensurirten Orgelpfeifen, dann mit Saiteninstrumenten und einer Flöte in angegebener Weise experimentirt.

[2]) Eine Vorahnung dieser Theorie findet sich bei Zamminer S. 257.

baren Ton, überschaut; wir haben eine Vorstellung bekommen, wie aus einem mehr oder minder regellosen Lautgemenge einzelne Klänge abgeschieden werden können, und dadurch den Beweis erbracht, dass diese Klänge in ihm enthalten waren; wir haben endlich erkannt, dass die messbaren Töne theils von Geräuschen, theils von Nebenklängen begleitet sein müssen, weil diese es sind, die die Klangfarbe bilden, jenes Merkmal, von welchem wir auf die Verschiedenheit der Tonquellen schliessen.

Die wichtigsten Grundgesetze der Klangentstehung, die sich aus unseren bisherigen theoretischen Betrachtungen ergaben, sollen hier durch einige Versuche ihre praktische Bestätigung erfahren. Diese Sirenenscheibe (Fig. 50) hat in zwei concentrischen Reihen eine gleiche Anzahl von Löchern, die in der einen Reihe in gleichen (*a*), in der anderen in ungleichen (*b*) Abständen angebracht sind. Setzt man die Scheibe in Umdrehung und bläst mit einem Röhrchen, dessen Oeffnung der Grösse der Löcher entspricht, abwechselnd gegen die Lochreihen, so wird man mittels der Reihe *a* einen musikalischen Ton von, je nach der Schnelligkeit der Rotation wechselnder, aber bestimmter Höhe, mittels der anderen, *b*, jedoch nur völlig klangloses Geräusch hervorbringen.



Fig. 50.

Dasselbe wird erfolgen, wenn man, statt einen Luftstrahl durch die Löcher zu treiben, die Ecke eines Kartenblattes an die Lochreihen hält.

In ähnlicher Weise wird Klang von bestimmter Höhe hervorgerufen, wenn man die Zähne eines in rasche Drehung versetzten Zahnrades[1]) (Fig. 51) gegen das Kartenblatt schlagen lässt.

Diese Fundamentalversuche lehren uns:

1. dass nur periodische und isochrone Impulse Klang, nicht gleichartig aufeinanderfolgende aber nur Geräusch hervorbringen;

[1]) Diese Methode hat Savart zum Urheber.

2. dass schnell aufeinanderfolgende, periodisch-isochrone Impulse, wie immer sie erzeugt werden, Klang hervorbringen, ohne dass ein selbstklingender Körper dabei thätig sein muss, denn in unserem Falle, nämlich in der Art, wie sie hier zur Verwendung gelangen, können weder das Zahnrad, noch das Kartenblatt, und ebensowenig die Scheibe und der aus dem Röhrchen kommende Luftstrom als klingende Körper angesehen werden; endlich lehrten uns diese Versuche



Fig. 51.

3. dass die Tonhöhe mit der Zahl solcher, in bestimmter Zeit erfolgender, isochroner Impulse in einem geraden Verhältnisse steht, d. h. mit ihr zu- oder abnimmt, da wir uns überzeugt haben, dass der Ton um so tiefer, je langsamer, dagegen um so höher wird, je schneller die Umdrehungen von Scheibe oder Zahnrad erfolgen.

Und damit gelangen wir zu einer weiteren Etappe unserer Untersuchungen, zu jener nämlich, welche die Verbreitung des Schalles zum Gegenstande haben wird. — Hievon das nächste Mal.

---

6. Vortrag.

(Die Verbreitung des Schalles.)

Wir haben zuletzt das Wesen des Schalles von seinen wirrsten Aeusserungsformen als Geräusche bis zu seiner klarsten, als absoluten, messbaren Ton kennen gelernt. Begleiten wir nun den Schall auf seinem Wege von dem Augenblicke seines Entstehens an bis zu dem Momente, wo er an unser Ohr gelangt; mit anderen Worten: betrachten wir jetzt die Art seines Fortschreitens, seiner Verbreitung im Raume.

Wenn wir durch Schlag, Stoss, durch Explosion oder auf irgend eine andere Art einen Schall hervorrufen, so werden wir ihn gleicherweise hören, möge er vor oder hinter, über oder unter uns erzeugt worden sein.

Der Schall verhält sich demnach wie das Licht. So wie dieses im Momente seines Entstehens den Raum, in dem es aufleuchtet, gleichzeitig und gleichmässig erhellt, so breitet sich auch der Schall vom Punkte seines Entstehens nach allen Richtungen zugleich aus. Je nachdem wir uns der Schallquelle näher oder entfernter befinden, werden wir den Schall stärker oder schwächer vernehmen. Es besteht also auch hierin zwischen Licht und Schall die vollste Analogie. Endlich werden wir finden, dass bis zu einer gewissen Entfernung Schlag und Schall zugleich erfolgen; über diese Entfernung hinaus werden wir die den Schlag ausführende Bewegung sehen, den Schall aber immer später hören, je grösser die Entfernung ist.

Auf diese stets und überall zu machenden Wahrnehmungen gründen sich nun alle Gesetze der Verbreitung, der Stärke und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles.

Da wir den Schall nach jeder Richtung hören und, bei gleicher Entfernung, in jeder Richtung gleich stark hören, so folgt nothwendig daraus, dass sich der Schall kugelschalenförmig verbreitet, wobei die Schallquelle stets den Mittelpunkt einnimmt. Jeder einzelne Impuls erregt eine solche Kugelschale, die sich sofort vergrössert und unaufhaltsam weiterschreitet. Der nächste Impuls sendet eine neue Kugelschale nach. Je rascher diese Impulse aufeinanderfolgen, um so näher werden diese Schalen beisammen liegen.

Wir wollen diese Thesen eingehender betrachten. —

Stellen wir uns das Zifferblatt einer Uhr vor, deren Zeiger auf jeder denkbaren Stelle seines Umganges eine, vom Mittelpunkte bis zum Umfange des Zifferblattes reichende Linie zurücklässt. Man nennt diese Linien, deren Zahl als unendlich gedacht werden kann, Radien, Strahlen. — Wenn wir uns nun weiters vorstellen, dass dieses Zifferblatt, um die beiden einander entgegengesetzten Radien (die zusammen den Durchmesser bilden) sich drehend, in jeder seiner Stellungen während dieser Drehung einen Kreis zurücklässt, so dass die Zahl dieser Kreise ebenfalls eine unendliche wäre, so wird das hieraus resultirende Gesammtbild unsere vorer-

wähnte Kugelschale darstellen, aus deren Mittelpunkt nach allen Richtungen der Mantelfläche Strahlen auslaufen, die wir, weil es sich hier um die Erklärung eines akustischen Vorganges handelt, Schallstrahlen nennen wollen.

Verfolgen wir nun den Gang der aus lauter Schallstrahlen zusammengesetzt gedachten, sphärisch sich ausbreitenden Kugelschalen.

Bekanntlich muss, um Schall zu erregen, ein elastischer Körper Oscillationen, d. h. hin- und hergehende Bewegungen machen.

Denken wir uns nun eine Kugel als den Ausgangspunkt des Schalles, so wird diese Kugel, da sie sich um ein Schallcentrum gruppirt, beziehungsweise dieses darstellt, unmöglich pendelartig, d. i. lediglich nach zwei entgegengesetzten Richtungen oscilliren können, weil dann auch der Mittelpunkt diese Oscillationen nothwendig mitmachen müsste, während er doch als solcher nur unbeweglich gedacht werden kann, sondern die Kugel wird ihre Oscillationen durch periodische Volumänderungen, d. h. mittels abwechselnder Vergrösserung und Verkleinerung ihres Umfanges bewirken, und bei jeder Vergrösserung die sie umgebenden Luftmolecule in radialer Richtung vorstossen, bei der daraus entstehenden Zusammenziehung aber einen verdünnten Raum zurücklassen, in welchem die vorgestossenen und dadurch dichter gestellten Molecule wieder zurückschwingen, so dass also die die Kugel umgebende Luft deren Bewegungen mitmacht, Bewegungen, die wir gelernt haben, als fortschreitende zu bezeichnen.

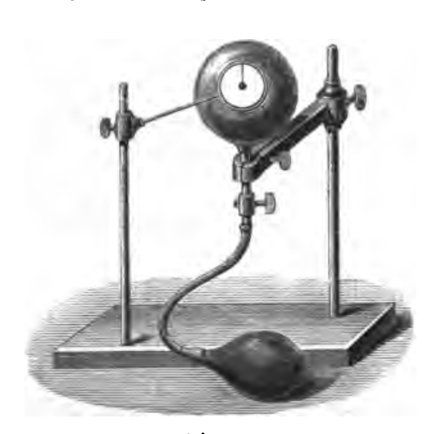


Fig. 52.

Von dieser Art Oscillation geben Ihnen die periodisch abwechselnden Volumveränderungen dieses Kautschukballes (Fig. 52) eine — allerdings sehr materielle — Vorstellung, indem ich den Füllball im Takte zusammendrücke und dadurch den dünnen Ballon abwechselnd vergrössere und verkleinere. — Es ist einleuchtend, dass jede

Vergrösserung die gesammte, den Ball umgebende, nächste Luftschichte nach allen Richtungen radial und gleichmässig vorstösst, wie dies die Bewegungen des Pendelchens sehen lassen. — Dass bei der Verkleinerung des Balles momentan ein verdünnter Raum um den Ball entsteht, in welchem die vorgestossene und dadurch verdichtete Luftschichte zurückschwingt, bedarf keiner weiteren Ausführung.

Um nun den weiteren Verlauf zu verfolgen, greifen wir zu unserem, in einer der früheren Vorlesungen behandelten Beispiele von der Röhre mit den Scheibchen und dem sie verbindenden elastischen Medium zurück.

Stellen wir uns die betreffende Röhre als eine der unendlich vielen Radien unserer Kugelschale vor; denken wir uns aber die Röhre beseitigt und die Scheibchen zu kugelförmigen Schalen zusammengeschlossen, die sich in gleichmässigen Schichten übereinander lagern, ungefähr wie in einer Zwiebel.

Durchschneiden wir diese und betrachten wir ihren (Fig. 53) im nebenstehenden Schema dargestellten Durchschnitt.

Wie Sie bemerken, sind zunächst aus den Scheibchen der Figur 39 Kugelschalen, oder, um sie fortan wissenschaftlich richtig zu bezeichnen, »Schallsphären« geworden.

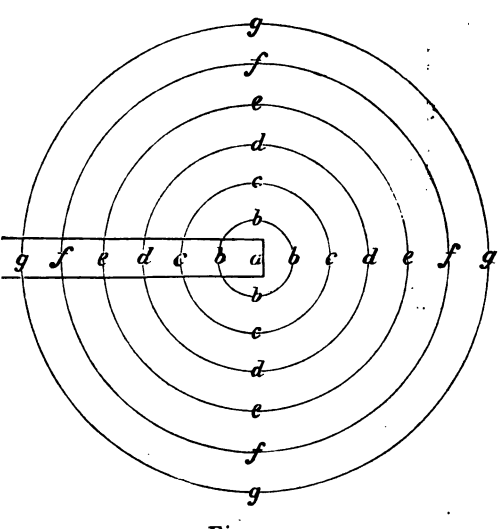


Fig. 53.

Betrachten wir das Centrum der Kugelsphäre *a* als den Ausgangspunkt des Schalles und deren Mantelfläche *b* als die erste Schallschichte, und denken wir uns, dass die erste Vergrösserung dieser innersten, die Primitiverregung vorstellenden Schallsphäre stattfindet.

Was wird die Folge sein? Die Schichte *b* wird nach allen Richtungen fortgedrängt und erzeugt vor sich hin eine Verdichtung, welche, gleichmässig nach allen Richtungen sich ausbreitend, nach

einem bestimmten Zeitverflusse bei der Sphäre *c* nach einem ganz gleichen Zeitverfluss bei *d* u. s. w. anlangt und so immer weiter fortschreitet, bis sie entweder unser Ohr trifft, oder bei zu grosser Entfernung in der Energie ihrer Verdichtungen bereits so geschwächt ist, dass sie unser Gehör nicht mehr zu erregen vermag.

Während aber die Schallsphäre *b* bei *c* angelangt ist und ihren Impuls auf diese Schichte übertragen hat, hat sich die bis *c* erweiterte Kugelsphäre *b* zusammengezogen. Es entsteht dadurch eine Verdünnung, die den gegen *c* dichter gestellten Moleculen der Sphäre *b* Raum zum Zurückschwingen bietet, um bei der nächsten Vergrösserungs-Oscillation der Primitivsphäre vom neuen vorgestossen und verdichtet

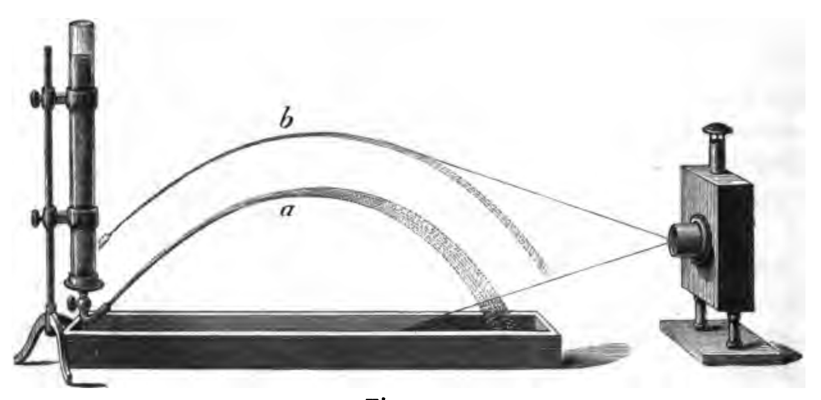


Fig. 54.

zu werden. Und so folgt eine Schallsphäre der anderen, bis sie — wie gesagt — an unser Ohr gelangen, dessen Trommelfell den dynamischen Druckdifferenzen folgt, indem es von dem Stosse der Verdichtungssphäre nach innen gedrückt wird, während die Verdünnungssphäre das Rückschwingen der Membrane ermöglicht und sie auf diese Weise in stehende Schwingungen versetzt, die genau mit den Schwingungszeiten der empfangenen Impulse übereinstimmen.

Dass es sich hier aber thatsächlich um dynamische Störungen der Luftschichten oder, populär gesagt, um wirkliche Luftstösse handelt, lässt sich auf verschiedene Art beweisen. Im Allgemeinen sind wir nicht im Stande, diese Stösse mit einem anderen Organe als dem des Gehörs zu empfinden; nur bei heftigen explosiven Erschütterungen,

wie Minensprengungen, Kanonenschüssen, nahen Donnerschlägen können die Luftbewegungen auch fühlbar werden.

Folgende Experimente werden Ihnen die sichtbare Wirkung von Schallen auf andere Körper zeigen, indem Schalle, die für uns nur durch das Gehör wahrnehmbar sind, von diesen Körpern gleichsam gefühlt werden.

Ein Wasserstrahl, der in flachem, wagrechtem Bogen einem dünnen Röhrchen entströmt (Fig. 54), trennt sich, je weiter er sich von der Ausflussstelle entfernt, in immer zahlreichere, divergirende, perlenschnurartige Fäden (*a*). — Erklingt ein passender Ton einer

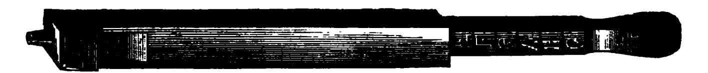


Fig. 55.

Pfeife (den man am leichtesten mittelst einer Stimmpfeife (Fig. 55) findet) oder eines sonstigen Instrumentes oder der menschlichen Stimme, so schliessen sich die einzelnen Fäden sofort zu einem einheitlichen Bande zusammen (*b*).[1])

Wenn eine Gasflamme aus einem Lochbrenner unter sehr hohem Drucke (Fig. 56 *a*) oder — umgeben von einer weiten Röhre — (Fig. 56 *b*) unter sehr geringem Drucke brennt, so wird die Flamme gegen die leiseste Erschütterung der Luft ungemein empfindlich, zumal gegen hohe Klänge. Solche Flammen, besonders die letzterer Art, reagiren auf das Schütteln eines Bundes Schlüssel, einer Schachte mit Zündhölzchen, auf ein leises Klopfen, auf das Ticken einer nahen Taschenuhr, eines Metronoms u. dgl., auf den Ton einer Spieluhr, eines Glasstreifens, eines im Nebenzimmer erklingenden Pfeifchens, auf das Zerreissen oder Zerknittern eines Blattes Papier, auf das Pizzicato einer Violine, auf den Riefenton eines Bucheinbandes, auf das leiseste Geräusch des Kratzens, Zischens, auf Vocale u. s. w. Sind solche Töne oder Geräusche schwach, so sinkt die Flamme in sich zusammen, neigt sich und beugt sich entsprechend dem Tempo

[1]) Da das Ausfliessen eines Wasserstrahles aus enger Oeffnung — wie dies später (im 15. Vortrage) erörtert werden wird — ein oscillatorischer Vorgang ist, so dürfte der Zusammenschluss der Fäden als das Resultat einer Interferenzwirkung übereinstimmender Schwingungsbewegungen der Luft und des Wassers anzusehen sein.

und der Stärke der Impulse. Werden letztere zu stark, so erlischt die Flamme.

Noch einige Beispiele der mechanischen Wirkung der Schallstrahlen. Ein an einem Coconfaden hängendes, leichtes Kartenblättchen *de* (Fig. 57) stellt sich axial zur Richtung des Schallstrahles *a* einer klingenden Stimmgabel (Fig. 58); denn falls das bei *d* (Fig. 57) aufgehängte Blättchen sich bei *e* gegen *b* oder *c* (Fig. 58) bewegen wollte, wird es durch die Schallstrahlen, beziehungsweise die Verdichtungsstösse des Segmentes *bc* in die Richtung *de* zurückgetrieben und

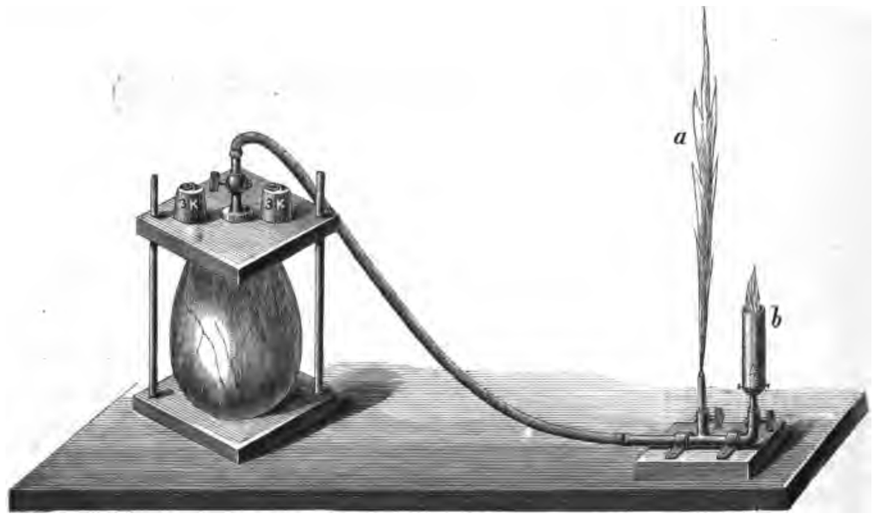


Fig. 56.

in derselben erhalten. Aus gleichem Grunde werden sich vier, um einen Schwerpunkt horizontal geordnete, an einem Coconfaden hängende, leichte Resonatoren (sogenanntes Reactionsrädchen) (Fig. 59) in der, den Oeffnungen derselben entgegengesetzten Richtung drehen, sobald ihnen die Mündung des Klangkästchens einer tönenden Gabel nahe gebracht wird. Ein auf zwei Fäden hängender, mit dem Tone einer Stimmgabel übereinstimmender, aus dünnem Kartenpapier verfertigter, leichter Resonator (Fig. 60), wenn dessen Mündung vor die Oeffnung des Klangkästchens der Gabel gebracht wird, geräth in Schwingungen, sobald die Gabel ertönt.

In welcher Weise die Oscillationen der Molecule des schallleitenden Mediums Gehörsempfindungen hervorrufen, und wie diese

durch die verschiedenen Theile des Gehörapparates weiter — und endlich der Seele zugeführt werden, um in ihr die Vorstellung eines bestimmten Klanges entstehen zu machen: alles dieses wird den Gegenstand erst späterer Betrachtungen bilden.

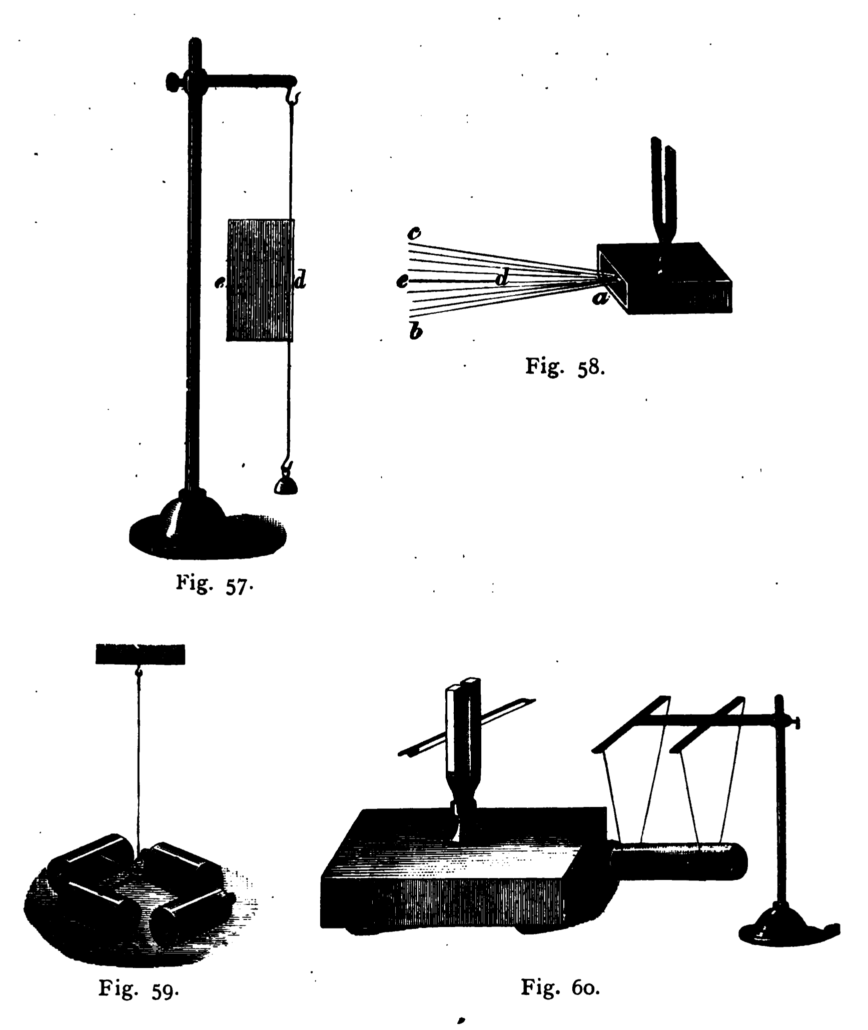


Fig. 57. Fig. 58.

Fig. 59. Fig. 60.

Da Sie sich nun — wie ich glaube — ein recht deutliches Bild von einer solchen zum Ohre gelangenden Schallsphäre zu machen im Stande sind, so wird es Ihnen nicht schwer fallen, für Erscheinungen die Erklärung zu finden, die mit der Schallverbreitung zusammenhängen.

Die Frage z. B., wie es kommt, dass die von der Schallquelle geradlinig ausgehenden und fortschreitenden Schallstrahlen nicht nur von dem der Schallquelle zugewandten, sondern von dem abgewandten Ohre (man überzeugt sich davon durch das Schliessen des anderen) ebenfalls, wenn auch vielleicht um eine Nuance schwächer, vernommen wird, werden Sie sich dahin beantworten, dass, nachdem jedem Verdichtungsmomente sein Verdünnungsmoment folgt, in welchem die Rückschwingung des vorgestossenen Moleculs stattfindet, das Trommelfell des abgewandten Ohres von der rückschwingenden Schallwelle getroffen wird. Auch die Annahme, dass zufolge des Beugungsvermögens des Schalles das abgewandte Ohr auch von einem Theile der Verdichtungswelle afficirt wird, dürfte sich nicht in allen Fällen abweisen lassen.

Im geschlossenen Raume kommt dem abgewandten Ohre aber ausserdem noch ein wichtiger Factor zu Hilfe, und das ist die Reflexion der Schallstrahlen von den Wänden, eine Erscheinung, die wir ebenfalls später eingehender betrachten werden, und die für das Hören je nach Umständen ebenso förderlich — als störend sein kann. —

Aus der sphärischen Verbreitung des Schalles ergeben sich aber noch weitere Erscheinungen. Die eine ist die, mit der Entfernung von der Schallquelle verhältnissmässig rasch abnehmende Stärke (Intensität) des Schalles. Da die von einem Mittelpunkte ausgehende, nach allen Richtungen gleichförmig fortschreitende Bewegung sich auf immer grössere kugelförmige Schichten des Mittels, also auf eine grössere Masse übertragen muss, so muss die Intensität der Bewegung, oder, was dasselbe besagt, die Amplitude der Schwingungen, oder die Dichtstellung der Molecule, im Verhältnisse dieser Masse abnehmen.

Da nun die Masse mit der Kugelfläche der sich immer mehr erweiternden Schallsphäre wächst, jede Kugelfläche aber im quadratischen Verhältnisse zu ihrem Durchmesser steht, so folgt daraus, dass die Stärke des Schalles im eben denselben Verhältnisse zur Entfernung von dem Ausgangspunkte des Schalles abnehmen muss, ein Gesetz, welchem alle auf undulatorischen Bewegungen beruhenden Erscheinungen, wie das Licht und die Wärme, aber auch die Gravitation und der freie Fall der Körper unterliegen.

Ich schalte hier ein, dass man bezüglich der Messung der Tonstärke noch keine Vorrichtungen kennt, wie solche für Photo- und Calorimetrie, namentlich für letztere, in dem Thermometer in so vollendeter Art bestehen, so dass vorderhand, wenn auch durch mechanische Mittel unterstützt, die Messung der Tonstärke doch wesentlich noch auf der Schätzung nach dem Gehörseindrucke beruht.

Es gibt mehrere Methoden für solche Messungen. Man kann dazu Uhren von gleich starkem Schlage anwenden, indem man auf die doppelte Entfernung 4, auf die dreifache 9 aufstellt und die Schallstärke der summirten Impulse mit je einer der beim Beobachter befindlichen Uhr vergleicht. Eine andere Methode hat Schafhäutl in seiner »Phonometrie« angegeben. Sie beruht auf dem freien Falle von gleichen Kugeln aus verschiedener Höhe, und dem Vergleiche mit der Einheitsschallstärke, die er Dynamie nennt, und wobei die Intensitäten zu- und abnehmen im Verhältnisse der Fallhöhe multiplicirt mit der Schwere des fallenden Körpers. — Nach M. v. Baumgarten (Wien) kann zur Messung der relativen Schallstärke der Aufschlag verschieden schwerer Hämmer dienen. — Auch mittels einer Reihe gleich hoher und gleich constant starker Zungentöne (auf einer Windlade) lässt sich die relative Intensität verschiedener Tonquellen bestimmen.

Kehren wir nach dieser Abschweifung zu unserem Gegenstande zurück.

Nach dem vorerwähnten Gesetze der quadratischen Entfernung wird also eine Luftkugel, die z. B. einen Durchmesser von zwei Metern hat, eine viermal so grosse Oberfläche darbieten, als eine, deren Durchmesser nur einen Meter beträgt. Demnach wird die Schallkraft auf jedem Punkte der Oberfläche dieser Kugel bei zweifacher Vergrösserung derselben viermal, bei dreifacher neunmal, bei vierfacher sechzehnmal u. s. w. schwächer sein, oder, was damit gleichbedeutend ist: das Ohr wird den Schall auf zweifache Entfernung von der Schallquelle viermal, auf dreifache neunmal schwächer vernehmen u. s. w. Geht schon bei verhältnissmässig geringen Veränderungen der Entfernung eine grosse Menge der von der Schallquelle ausgehenden Klangmasse durch Schwächung derselben in Folge ihrer Ausbreitung für das Ohr verloren, so ist der quantitative Verlust an Schallstrahlen, den es in Folge der kugelförmigen Ausbreitung der die

Gehörsimpulse erregenden Verdichtungs- und Verdünnungssphären erleidet, eine noch weit grössere. Man wird von der enormen Quantität von das Ohr nicht berührenden Schallmassen, die ein tönender Körper entsendet, überrascht sein, wenn man eine einfache Rechnung anstellt, von deren Resultat man durch die Betrachtung dieser Zeichnung (Fig. 61) einen kleinen Vorbegriff bekommen wird, nachdem man aus derselben sofort ersieht, dass nur die zwischen *xz* liegenden Schallstrahlen das Ohr treffen können, während alle übrigen zwischen *xyz* befindlichen an demselben vorübergehen, mithin — von Reflexionswirkungen hier abgesehen — für dasselbe nicht existiren.

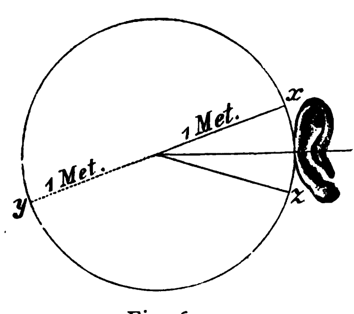


Fig. 61.

Nehmen wir an, unser Ohr befinde sich von einer Schallquelle, die wir uns als Mittelpunkt der fortschreitenden Verdichtungs- und Verdünnungssphären zu denken haben, einen Meter weit entfernt. Es wird demnach der Durchmesser der Schallkugel in dem Augenblicke, als sie unser Ohr berührt, die Länge von zwei Meter haben. Die Ober- oder Mantelfläche einer Kugel steht, wie schon erwähnt, im quadratischen Verhältnisse ihres Durchmessers zu ihrem Umfange. Demnach finden wir den Umfang dieser Mantelfläche, wenn wir die Ludolfische Zahl π[1]) = 3·142, eine Zahl, welche das constante Verhältniss des Umfanges zum Durchmesser ausdrückt, mit dem aufs Quadrat erhobenen Durchmesser = 2^2 Meter = 4 Quadratmeter oder 200 mal 200 Quadratcentimeter multipliciren (= 40.000 × 3·142); somit ergibt sich die Zahl von 125.680 Quadratcentimeter für die Mantelfläche unserer Schallkugel. Da nun der Umfang der Ohrmuschel eines normalen Menschen beiläufig 10 Quadratcentimeter beträgt, so gelangt bei der Entfernung von 1 Meter nur der 12.568ste Theil des Schallquantums unserer Kugel zu unserer Wahrnehmung, während der Rest für uns vollständig verloren geht. — Was endlich noch zur Schwächung des Schalles im Allgemeinen wesentlich beiträgt, ist der Umstand, dass nicht nur scheinbar in den

[1]) Man pflegt die Ludolfische Zahl mit dem griechischen Buchstaben π (Pi) zu bezeichnen.

weitaus meisten, sondern — streng genommen — in allen Fällen die atmosphärische Luft es ist, die zwischen der Schallquelle und unserem Gehör den Vermittler bildet. Die Luft aber gehört unter den elastischen Körpern fast zu den schlechtesten Schallleitern, wie wir das später erfahren werden. Trotzdem ist sie, wie zum Leben, gleich unentbehrlich für das Hören. Hier für letzteres ein Beweis.

Ein Glöckchen in dem Recipienten einer Luftpumpe (Fig. 62) wird nicht gehört, wenn man den Recipienten luftleer macht; sobald wieder Luft in die Glocke eingelassen wird, erscheint auch der Ton wieder. —



Fig. 62.

Thatsächlich gibt es keine anscheinend noch so directe Uebertragung von Schall zum Gehör durch andere Medien, bei welchen die Mitwirkung von Luft absolut ausgeschlossen wäre.

Fälle scheinbar ohne Luftvermittlung stattfindender, allgemein bekannter Schallübertragungen, wie das Hören des Klanges einer mit den Zähnen gespannten Saite, des Tickens einer Uhr oder das Tönen einer Stimmgabel, die man an den Kopf oder an die Zähne, besonders an die oberen, drückt, das Hören der eigenen Stimme u. s. w., und dies Alles bei festverschlossenen Ohren, erklären sich durch die Resonanz der mit Luft gefüllten Hohlräume des Kopfes, so dass auch in allen diesen und ähnlichen Fällen die Luft als die eigentliche Trägerin und Vermittlerin des Schalles erkannt werden muss. —

Sie werden nach Allem, was wir über die Verbreitungsart des Schalles bisher erfahren haben, gewiss zugeben, dass es trotz alledem sehr weise von der Natur eingerichtet ist, dass die Schallverbreitung an allen diesen von uns wahrgenommenen Mängeln leidet. Wie exclusiv stände es z. B. um die musikalischen Genüsse, wenn alle,

von den Tönen ausgehenden Schallstrahlen blos in einer Richtung, gleichwie eine Kugel aus dem Rohre, fortschreiten würden, sonach nur von einem einzigen in dieser Richtung befindlichen Ohre vernommen werden könnten; die Musik würde ein Luxus, den sich nur Krösusse erlauben könnten. Als eine ebenso weise Einrichtung stellt es sich bei näherer Betrachtung heraus, dass die Luft ein schlechter Schallleiter ist.

Ja, dieser Mangel muss als ein wahres Glück bezeichnet werden, denn würde die Luft so gut leiten, wie ein Stab, ein Rohr, so wäre es mit dem Musikgenuss in mehr als einer Hinsicht bald vorbei.

Zunächst würden wir in kürzester Zeit taub sein, bis dahin aber wäre ein Zusammenspiel nur weniger Instrumente — wobei ich Trompeten und dergleichen sanfte Klangquellen ausschliesse — unerträglich; wie nun erst ein Monstreconcert von 5—6 Militär-



Fig. 63.

capellen! — Hier ein einfacher Beweis. Eine Stimmgabel an sich hat so wenig Ton, dass man sie schon auf eine sehr geringe Entfernung nicht mehr hört. Diese hier (Fig. 63) ist an einem Stabe befestigt, woran eine kleine Scheibe sich befindet. Ich streiche die Gabel an. Sie werden kaum einen Ton vernehmen. Ich drücke die Scheibe an Ihr Ohr und — der Ton der Gabel wird mit unerträglicher Gewalt Ihnen ins Ohr gellen.

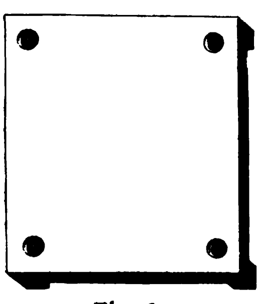


Fig. 64.

Wir brauchen die kleine Scheibe nur durch eine etwas grössere Platte zu ersetzen (Fig. 64) und die ganze Versammlung wird den Ton der Gabel vernehmen.

Den Grund aller dieser Erscheinungen werden wir demnächst kennen lernen.

7. Vortrag.

(Die Stärke des Schalles. — Schallleitung. — Telephon.)

Sie erinnern sich, dass beim Schalle, nachdem er entstanden ist, drei wesentliche Momente in Betracht kommen. Die Art seiner Verbreitung, seine Stärke, und die Geschwindigkeit seiner Fortpflanzung. Das erste dieser Momente, nämlich die Art, wie sich der Schall im Raume verbreitet und zu unserem Gehör gelangt, haben wir letzthin behandelt und erledigt.

Wenn wir nun an die Erörterung der weiteren Frage gehen: worin die Stärke des Schalles beruht, so muss zunächst daran festgehalten werden, dass es sich hier immer nur um das relative Mass einer und derselben Schallquelle handelt, und dass die Frage, warum gleich hohe Klänge zweier verschiedener, durch gleich starke Impulse erregter, tönender Körper dennoch in der Schallkraft wesentlich differiren, in ein anderes Capitel gehört und hier ganz beiseite gelassen werden muss.

Würden wir die gestellte Frage dahin beantworten: »Die Stärke des Schalles wird durch die Intensität bedingt, mit der die Schallquelle erregt wurde«, so wäre damit nur gesagt, wodurch man die Schallstärke hervorzurufen vermag, nicht aber, worin sie ihren Grund hat. Zudem würde eine solche Erklärung, wenn sie eine wäre, weitaus nicht genügen, um alle hieher gehörigen Erscheinungen zu erschöpfen.

Wir haben erfahren, in wie mannigfacher Weise die von einer Schallquelle ausgehende und durch die uns umgebende Luft fortschreitende Schallmasse theils geschwächt, theils ganz vernichtet wird, bevor sie zu unserem Gehör gelangt, und wie viel ausserdem noch von dieser Masse unter gewöhnlichen Verhältnissen an uns völlig ungehört vorüber geht.

Diese Erwägung muss uns dahin führen, die Frage der Schallintensität einmal vom subjectiven und dann vom objectiven Gesichtspunkte zu betrachten, indem wir Fälle, in welchen wir bei unveränderter Intensität der Schallquelle stärkere Gehörseindrücke bekommen, von jenen trennen, in welchen der stärkere Eindruck in der gesteigerten Intensität der Schallquelle selbst beruht.

Stärkere Schalleindrücke bei unveränderter Intensität der Schallquelle erlangen wir, einmal, wenn wir uns der Schallquelle nähern oder, was dasselbe ist, diese uns näher bringen, weil unser Gehör von um so wirksameren Schallstrahlen getroffen werden muss, je weniger diese im Raume schon fortschreiten, sich ausbreiten und dadurch geschwächt werden konnten; ferner, wenn wir Mittel anwenden, um zu bewirken, dass von den, von der Schallquelle ausgehenden Strahlen möglichst viele unserem Ohr zugeführt werden.

Letzteres erreichen wir entweder dadurch, dass wir die Gehörsfläche vergrössern, oder, dass wir die seitliche Ausweichung der Schallstrahlen verhindern.

Das Erstere bewirken wir oft instinctiv, wenn wir unser Ohr, und zwar das besser hörende (wenige Menschen hören nämlich auf beiden Ohren gleich gut), der Schallquelle zuwenden, oder dadurch, dass wir die Handfläche schalenförmig gekrümmt an die Ohrmuschel legen, die Fläche der letzteren vergrössern und sie somit geeignet machen, eine grössere Menge von Schallstrahlen aufzunehmen und dem Gehörgange zuzuleiten.

Künstliche Apparate, deren Zweck es ist, die Schallstrahlen aufzufangen und zu concentriren, sind die sogenannten Hörrohre, in früheren Zeiten etwas unförmlich, aber praktisch — heute verschämt in Stöcken und Fächern verborgen, aber von geringem Nutzen. Die nächstbeste Pappröhre, ans Ohr gehalten, übt eine solche Concentration. Ueberzeugen Sie sich selbst. Hier eine Anzahl solcher Röhren. Ich werde einen Harmoniumton gleichmässig aushalten. Durch die Röhre gehört, werden Sie ihn viel stärker vernehmen.

Die seitliche Ausweichung der Schallstrahlen wird durch Leitungsröhren, wie man sie in Hôtels und in modernen Häusern hat, verhindert. Der Schall pflanzt sich in Röhren auf sehr lange Strecken mit fast unverminderter Stärke fort, und zwar um so besser und weiter, je glatter die Wandungen der Leitung sind, weil durch die Reibung unter allen Umständen Einiges von der Intensität verloren geht.

Lassen Sie uns mit einer solchen Communicationsröhre ein paar Versuche vornehmen. Schreiben Sie einige beliebige Zahlen oder Worte auf die Tafel. Eines von Ihnen flüstere eine dieser Zahlen (oder Worte) in das Mundstück der Leitungsröhre so leise, dass es

die Zunächstbefindlichen nicht hören können. Ein Anderer wolle an dem, in das Nebengemach geführten Ende der Röhre horchen und jedes der vernommenen Worte laut ausrufen; — es werden die ihm zugeflüsterten sein.

Halten wir vor einer Mündung der Röhre eine tönende Stimmgabel, — Sie werden kaum ihren Klang vernehmen. Nähert man dem anderen Röhrenende die Mündung eines mit der Gabel gleichgestimmten Klangkästchens, so wird der Gabelton laut hörbar werden.

Eine andere Art, die Schallstrahlen zu concentriren, wird dadurch bewirkt, dass man ihre kugelschalenförmige Ausbreitung verhindert und sie zwingt, in gerader Richtung fortzuschreiten und gleichsam ein paralleles Strahlenbündel — allerdings nur bis zu einer gewissen Entfernung hin — zu bilden.



Fig. 65.

Das Jedem, der eine Dampfschifffahrt gemacht hat, wohlbekannte Sprachrohr (Fig. 65), mit dem der Capitän seine Commandoworte dem Maschinenwärter, Matrosen u. s. w. zuruft, ist ein solcher Apparat, um die Stimme auf weite Entfernungen vernehmbar zu machen. Die concentrirende Wirkung dieses Apparates liegt hauptsächlich in der konischen Form, welche die, durch Zurückwerfungen von der Rohrwand verstärkten und zugleich parallel gerichteten Schallstrahlen als compacte Masse fortzuschreiten nöthigt.

Die Schallstrahlen — wie wir dies später erkennen werden — werden gleich den Lichtstrahlen in demselben Winkel, in dem sie einfallen, zurückgeworfen (reflectirt). Da die Wände des Sprachrohres konisch von einander weichen, so erfolgt die Zurückwerfung der Schallstrahlen in immer stumpferen Winkeln, wodurch die Strahlen eine parallele Richtung erhalten, wie dies in Figur 66 schematisch dargestellt ist.

Dass die subjective Schallempfindung vermindert wird durch Hindernisse, die sich zwischen die Schallquelle und unser Ohr stellen, bedarf nicht besonderer Auseinandersetzung. Denn, wiewohl die Schall-

sphären in Folge ihres Beugungsvermögens, gleich wie tropfbarflüssige Körper, das Hinderniss umgehend, hinter demselben sich wieder vereinigen und weiterschreiten — ich erinnere an das seinerzeit gebrauchte Beispiel von dem im Flusse liegenden Felsblocke — so erfahren sie doch eine Schwächung.

Wir werden z. B. in einer Kirche, in einem Concertsaale, wenn wir hinter einem Pfeiler uns befinden, der zwischen uns und dem Orchester steht, oder wenn wir hinter einer Reihe vor uns stehender Menschen sitzen, bei weitem schwächere Eindrücke von den tönenden Massen erhalten, als wenn bei unveränderter Entfernung zwischen ihnen und uns diese Hindernisse nicht vorhanden wären.

Wir befinden uns gleichsam im Schallschatten.

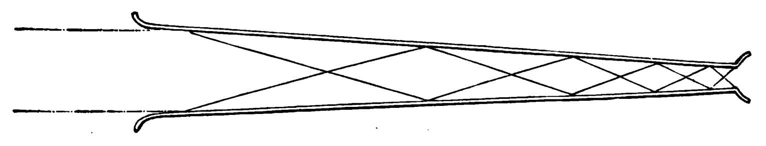


Fig. 66.

In diese Kategorie gehört endlich auch die Zuführung der Schallstrahlen zu unserem Ohr durch besser leitende Medien. Die eingehendere Betrachtung dieses Punktes dem Capitel über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles vorbehaltend, sei jetzt nur bemerkt, dass Schallverstärkungsmittel dieser Art leider eine nur sehr beschränkte Anwendung gestatten. Wie durch Röhren, sind wir auch im Stande, durch Stäbe, Drähte, Flüssigkeiten, kurz durch elastische Medien, die dichter sind als die Luft, selbst leise Töne auf grosse Entfernungen deutlich zu hören. Solche Mittel bieten jedoch manche Schwierigkeit. Man müsste z. B. jedes Instrument für jeden Hörer mit einem Stabe verbinden, was bei einem Orchester und einigen tausend Zuhörern einen ganzen Wald von Stäben erfordern würde, abgesehen davon, dass der Klang von Instrumenten, deren Töne durch Luftsäulen erzeugt werden, sich auf diese Art doch nicht fortleiten lässt. Im Wasser ist der Ton viermal so stark als in der Luft. Man könnte also beispielsweise einen Chor von Meerjungfrauen auf vierfach grössere Entfernung unter dem Wasser ebenso deutlich hören, als von Landjungfrauen auf trockener Erde. Es ist bloss erforderlich, den Kopf während der Production unter Wasser

zu tauchen. Wie Sie zugeben werden, hätte auch dieses seine Schwierigkeiten, besonders bei längeren Vorträgen. Um Ihnen aber in bequemerer Form eine Probe beider erwähnten Schallvermittlungsarten zu geben, wollen wir die mit dem Stabe verbundene Stimmgabel (Fig. 63) in der denkbarst zarten Weise, nämlich bloss durch den Hauch des Mundes erregen, um von der Ueberlegenheit der Leitungsfähigkeit dieses Mediums gegenüber der Luft uns zu überzeugen. — Mit ihrer Scheibe in ein auf unsere Resonanzplatte (Fig. 64) gestelltes Wassergefäss getaucht, liefert unsere Gabel (Fig. 63) den Beweis, dass die Schallleitungsfähigkeit des Wassers eine grössere ist, als die der Luft.

Die so vielfältig gemachten Erfahrungen, dass sowohl feste wie flüssige Körper den Schall besser und weiter leiten als die Luft, konnten denn auch nicht verfehlen, zu einschlägigen Versuchen anzuregen, um ein einfacheres und billigeres Mittel, als es die nur auf relativ kurze Strecken verwendbaren Röhren oder Stäbe sind, zu finden, um den Schall auf möglichst weite Entfernungen wirksam fortzuleiten, ein Problem, welches, Dank den Erfindungen der Amerikaner Graham Bell (1876), Hughes und Edison (1877), heute in vollkommener Weise im Telephon gelöst ist. Die Telephonie, gleich der Telegraphie zu den glänzendsten Ergebnissen naturwissenschaftlicher Forschung zählend, hat — wiewohl die Erfindung erst vor 30 Jahren durch einen Deutschen, Philipp Reis (1861), erfolgte — im Verkehrsleben bereits so ungemeine und stets zunehmende Verbreitung gefunden, dass man wohl annehmen darf, es gebe heute keinen in einer grösseren Stadt lebenden Menschen, der mit dem Telephon und seiner Leistungsfähigkeit nicht hinreichend vertraut wäre.

Ungeachtet dieses Umstandes, und der Thatsache, dass das Telephon selbst, sowie auch alle auf dasselbe basirten Versuche und Apparate bisher wenigstens für musikalische Zwecke keine Ergebnisse von wirklich praktischem Belange zu liefern vermochten, würde es dennoch unstatthaft erscheinen, von einer Betrachtung dieser eminent akustischen Errungenschaft von ebenso gemeinnütziger als wissenschaftlicher Bedeutung, hier ganz Umgang zu nehmen; wohl aber dürfte es aus den angeführten Gründen zulässig sein, den Umfang dieser Betrachtungen auf das Nothwendigste zu beschränken.

Verbinden wir zwei, je mit einer gespannten Rindsblase an einem Ende geschlossene kurze Röhren aus beliebigem Materiale mittels eines Bindfadens, den wir durch ein in der Mitte der Blase angebrachtes, feines Löchelchen von Aussen nach Innen durchziehen, und dessen inneres Ende mit einem Knoten versehen (Fig. 67) ist. Zwei von Ihnen entfernen sich mit je einer solchen Röhre in entgegengesetzter Richtung so weit, als die Länge des Bindfadens es gestattet, welche 100—120 Meter betragen kann. Wenn Beide nun den Faden etwas straff spannen und in dieser Lage erhalten, ohne dass er auf der Strecke mit Gegenständen in Berührung kommt[1]), so können sich Beide mittels dieser Vorrichtung vollkommen deutlich verständigen, wenn der Eine in die Röhre spricht und der Andere am offenen Ende seiner Röhre horcht. Die, durch die Laute und Silben des Sprechenden erzeugten Schallstösse setzen nämlich die Membrane in entsprechende Schwingungen, welche sich in dem Bindfaden, als einem relativ festen Körper fortpflanzen und die Membrane des Apparates, die der Horchende am Ohre hält, in vollkommen übereinstimmende Vibrationen versetzen, die als Schallstösse auf das Trommelfell des Ohres genau dieselben Impulse üben.



Fig. 67.

Diese primitive, als Kinderspielzeug dienende Vorrichtung, die aber einen wichtigen akustischen Lehrsatz illustrirt, den nämlich: dass die Zahl einfach periodischer Bewegungen, welche auf einer Membrane bestehen können, eine ebenso unbeschränkte ist, als in der Luft, indem eine Membrane, wie dies später ausführlich dargelegt werden wird, wenn sie nur hinlänglich gross und entsprechend elastisch ist, gleich dem Ohre auf jede Schwingungszahl innerhalb der Hörgrenzen zu reagiren vermag — dieses Spielzeug führte geraden Weges zur Erfindung des Telephons.

Es handelte sich darum, einmal grössere Entfernungen zu bewältigen und dann widerstandsfähigere Materialien als Bindfaden und Rindsblasen zu verwenden.

Damit, dass man die Schallstösse auf eine Membrane *aa* (Fig. 68) von dünnem Eisenblech wirken liess, deren Schwingungen

---

[1]) Man kann den Faden auch um Ecken führen, in welchem Falle er aber in Schlingen aus Bindfaden ruhen muss.

in einem Elektromagneten (bestehend aus einem durch die Stellschraube *b* regulirbaren, mit einer Inductionsspule *cc* versehenen Magnetstabe *d*) periodische elektrische Ströme hervorrufen, die, mittels der Drahtleitungen *ee* weitergeführt, in dem ganz gleich construirten Empfangsapparate elektrische Ströme von derselben periodischen und dynamischen Beschaffenheit erzeugt, welche, in Magnetismus umgesetzt, die Eisenmembrane correspondirende Schwingungen auszuführen zwingt — damit war das noch heute, zumal als »Empfänger« im allgemeinen Gebrauche stehende Telephon Bell's erschaffen.[1])

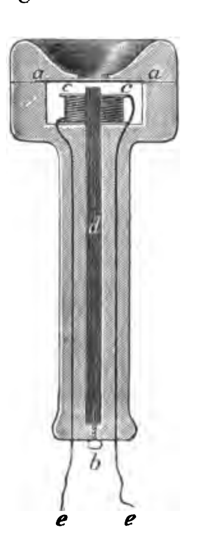


Fig. 68.

Der Sprechapparat »Sender« dagegen hat durch das von Hughes erfundene Mikrophon, welches im wesentlichen aus einem Systeme von, in den Stromkreis der Batterie eingeschalteten Kohlenstäbchen besteht, die in Lagern aus Kohlenstücken lose ruhen, welch' letztere mit der Sprechmembrane[2]) verbunden sind, eine ganz ausserordentliche Verbesserung erfahren. Durch die Vibrationen der Membrane in Erschütterungen mannigfaltigster Abstufung versetzt, verleiht das Mikrophon dem Sprechapparate einen so hohen Grad von Empfindlichkeit, dass man es nicht mit Unrecht als das Mikroskop des Klanges bezeichnet; denn selbst eine über die Membrane laufende Fliege verräth das Mikrophon, indem es ihre Schritte telephonisch hörbar macht.

Figur 69 stellt den Apparat in seiner ursprünglichen fundamentalen Anordnung dar. Allmälig wurde die Zahl der Kohlenstäbchen vermehrt und beträgt beispielsweise im Ader'schen Mikrophon deren Zahl zehn, wie aus Figur 70 ersichtlich ist.

Die erstaunliche Empfindlichkeit des Mikrophons wird dadurch herbeigeführt, dass die in ihren Lagern lose ruhenden, mit der Membrane des Sprechapparates verbundenen Kohlenstäbchen sich mit

---

[1]) Der Apparat wird im zerlegten Zustande demonstrirt und in seinen Bestandtheilen erklärt. Eine gleiche Erklärung erfährt die magnetelektrische Induction und das Mikrophon.

[2]) In neuerer Zeit treten Sprachmembranen aus dünnen Resonanzbrettchen zunehmend an Stelle der Eisenmembranen.

der Nuance der Erschütterung, welche die Membrane durch die Schallimpulse erfährt, in Uebereinstimmung setzen, indem sie den Contact mit ihrem Lager mehr oder weniger lüften. Es treten dadurch an Stelle der, in dem gewöhnlichen Telephone durch die Vibration der Membrane hervorgerufenen, intermittirenden Stromstösse gleichsam ineinander fliessende, die feinsten Nuancen der Schallimpulse wiedergebende Stromwellen, die von der Membrane des »Hörtelephons« genau reproducirt werden.

Durch die Einschaltung des Mikrophons in den Stromkreis des Telephons ist dasselbe geeignet geworden, nicht nur Worte, sondern auch Töne mit voller Deutlickeit auf relativ sehr grosse Entfernungen

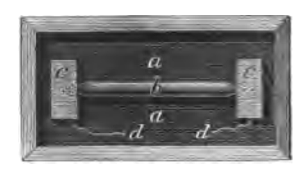
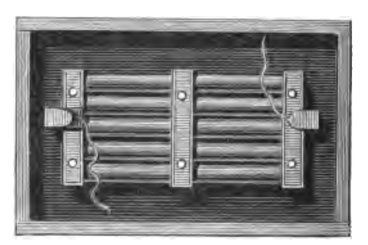


Fig. 69.


Fig. 70.

zu übertragen — vorderhand allerdings nur zum Ohre des einzelnen Horchenden. Es ist indessen nicht ausgeschlossen, dass es dem Erfindungsgeiste unsererer Zeit auch noch gelingen wird, was bisher noch nicht erzielt werden konnte: das Uebertragene einem grösseren Hörerkreise gleichzeitig vernehmbar zu machen.

Allein auch dann, wenn die Vervollkommnung so weit gediehen sein wird, dass man sich mit einem Theater oder Concertsaale wird verbinden können, um, am traulichen Kamine sitzend, eine Opern- oder Symphonie-Aufführung im eigenen Salon behaglich zu geniessen, so dürfte doch aller Wahrscheinlichkeit nach keine Gefahr dem Concert und Theater erwachsen, denn auch dann wird man Theater und Concerte besuchen; man will ja doch auch sehen und gesehen werden.

Im nächsten Vortrage wollen wir dieses Thema zu Ende führen.

8. Vortrag.

(Phonograph. — Objective Schallstärke. — Resonanz.)

Fahren wir in der Betrachtung der Leistungen des Fernsprechers fort. Das Telephon spricht mit uns. Wollen wir aber das Gehörte festhalten, so müssen wir es niederschreiben; die Stimme wie die Betonung des Sprechers selbst aber können wir nicht fixiren.

Wir können durch das Telephon nur übermittelte Töne und Accorde, sowie Tempo und dynamische Abstufungen notiren, vielleicht auch die Quellen erkennen, von welchen die Töne herrühren; das Organ eines Sängers können wir aber nicht wiedergeben und die Klangfarbe der Instrumente höchstens dann, wenn wir das Gehörte auf dem betreffenden Instrumente in jeder Beziehung absolut genau nachzuspielen im Stande wären.

Diese vielen scheinbaren Unmöglichkeiten sind durch die vielleicht merkwürdigste, und zugleich bewunderungswürdigste Erfindung unseres Jahrhunderts in ebenso viele Möglichkeiten verwandelt worden. Edison's Phonograph hat dieses Zauberwerk vollbracht. Der Phonograph nimmt Alles auf, was in ihn gesprochen, declamirt, gesungen, gepfiffen, gespielt, gegeigt, geblasen, getrommelt wird und wiederholt Alles mit absoluter Genauigkeit in derselben Tonhöhe und Klangfarbe, in demselben Zeitmasse, mit denselben Vortragsnuancen, sogleich oder nach Jahren, so oft man will.[1])

Und diese Wunder verrichtet — und dies ist vielleicht das nicht minder Merkwürdige an der Sache — ein Apparat von verblüffender Einfachheit (Fig. 71).

---

[1]) Man war anfangs der Meinung, Edison's Erfindung beruhe in einer Verbesserung des Scott'schen »Phonautographen«. Nichts kann mehr von einander verschieden sein als diese beiden Apparate.

Der Scott'sche, ein grosser trichterartiger Schallkörper, mit einer thierischen Membrane am schmalen Ende geschlossen, deren Schwingungen ein Schreibfederchen auf einen rotirenden, berussten Cylinder die in den Schalltrichter gesungenen oder gespielten Töne in Gestalt mehr oder weniger complicirter Curven aufzeichnet, kann von einem zusammengesetzten Tone ebensowenig als von einer Tonfolge ein Bild liefern und vermag das Aufgezeichnete tönend nicht wiederzugeben.

Eine horizontal drehbare, und sich zugleich in der Axenlinie nach beliebiger Richtung verschiebende Schraubenspindel (*a*), an welche ein Wachscylinder (*b*) gesteckt wird, der die Rotationen und Seitenbewegungen der Spindel mitmacht — dies ist Alles. Eine gewöhnliche telephonische Membrane (*c*) dient zur Aufnahme der Schallimpulse. Auf der Rückseite der Membrane ist in deren Mitte eine Spitze angebracht (*d*), die bei jeder Einwärtsbewegung der Membrane, je nach der Stärke der Impulse, in dem an der Spitze vorbeirotirenden Wachscylinder mehr oder minder tiefe Eindrücke hinterlässt, wodurch er allmälig mit um denselben spiralförmig laufenden punktirten Linien bedeckt wird. Lässt man nun nach beendeter Aufnahme den Cylinder seinen Weg bis zum Anfangspunkte leer zurückmachen und verbindet man das Gehäuse der Membrane mit einem oder mehreren gegabelten Hörschläuchen, so wird der Wachscylinder, in Bewegung gesetzt, das Aufgenommene mit genauer Wiedergabe aller und jeder Einzelheiten in Nuancen h ö r b a r reproduciren, und zwar, wie gesagt, so oft und wann man will. Die Reproduction erfolgt einfach dadurch, dass die mit der Membrane verbundene federnde Spitze der Reihe nach in alle von ihr früher gemachten, mehr oder weniger tiefen Eindrücke eintritt, wodurch die Membrane proportionale Erschütterungen erfährt, die, zum Trommelfell geleitet, es zwingen, dieselben Schwingungen zu vollführen, deren Umsetzungen in Tonempfindungen der Gehörsapparat unseres Ohres besorgt. — Die Vorrichtungen, um eine gleichmässige Rotation des Cylinders zu bewirken, sind Nebensache. Bedingung einer mit der Aufnahme absolut identischen Wiedergabe ist nur das genau gleiche Tempo der Rotation des Cylinders, weil andernfalls Tonhöhe und Zeitmass Aenderungen

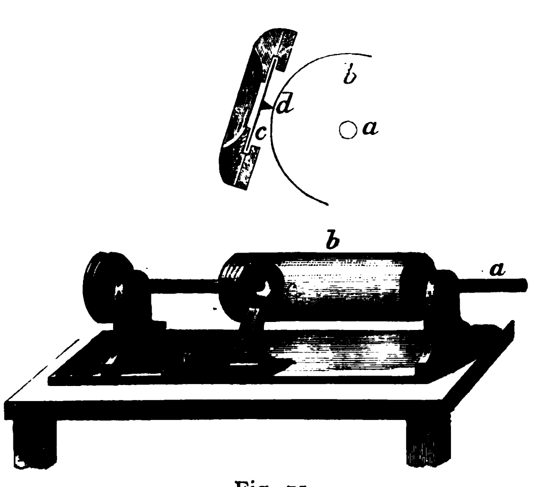


Fig. 71.

erfahren würden.[1]) Ist nun auch die Frage nach der Möglichkeit, das Reproducirte einem grösseren Hörerkreise gleichzeitig zu vermitteln, und ebenso — selbst wenn die vorhergegangene eine entsprechende Lösung finden würde — die weitere Frage, welchen praktischen Nutzen überhaupt und insbesondere für die Musik von dieser Erfindung zu gewärtigen wäre, derzeit eine noch vollkommen offene; so würde der Phonograph nichtsdestoweniger schon allein wegen seiner hohen wissenschaftlichen Bedeutung als Erklärer und Beweisführer einer Reihe akustischer Lehrsätze die ihm gewordene Anerkennung verdient haben.

So könnte — um Anderes unerwähnt zu lassen — die Lehre von der Klangfarbe, d. h. die Bestimmung der Zahl, Höhe und relativen Stärke der den Klang einer bestimmten Tonquelle charakterisirenden Theiltöne, eine Lehre, die heute ein fast noch unbegangenes Gebiet der Forschung bildet, aus der Zahl und relativen Tiefe der in der Wachsrolle enthaltenen Eindrücke der verschiedenen, das Wesen der specifischen Klangfarbe bildenden gleichzeitigen Wellensysteme durch Anwendung mikrometrischer Mittel vielleicht reiches, durch numerische Bestimmung werthvolles Material gewinnen.

Beschliessen wir den Gegenstand mit der Supposition eines speciellen Falles.

Nehmen wir an, der Phonograph, beziehungsweise dessen Wachscylinder, habe einen genau eine Secunde dauernden Ton der Trompete — sagen wir das $c^1 = 512$ Schw. — fixirt und eine Umdrehung des Cylinders erfolge genau in der Zeit einer Secunde und die Strecke der aufgerollt gedachten Mantelfläche des Cylinders betrage genau 10 Centimeter. Wir gehen nun an die Messung der Tiefe der auf dieser Strecke von der Membranspitze in das Wachs gemachten Eindrücke und bedienen uns hiebei des — vorläufig nur in der Phantasie existirenden — Mikrometers.

Wir finden, dass auf der Strecke Eindrücke von vier verschiedenen Tiefen vorkommen, die wir mit 1, 2, 3, 4 bezeichnen wollen; wir finden aber zugleich, dass alle vier Tiefen zu einander nicht in einem progres-

---

[1]) Um die Rotationsgeschwindigkeit vollkommen beherrschen zu können, hat Edison den früher nach Art einer Nähmaschine eingerichteten Fussbetrieb neuestens durch einen kleinen, mit einigen Chromelementen betriebenen elektro-magnetischen Motor von sehr gleichmässigem und regulirbarem Gange ersetzt.

siven Verhältnisse stehen und dass beispielsweise die Tiefe 3 von 4 mehr absteht, als von 2. Daraus schliessen wir folgerichtig, dass der Theilton 3 eine relativ grössere Amplitude hat, als 2 und 4, und demnach in der Klangstärke seine beiden Nachbarn — den letzten gewiss — erheblich übertrifft, der Schwankungen nicht zu gedenken, welche die Tiefen der Wachseindrücke durch dynamische Vortragsnuancen (f. p. cresc. dim. u. dgl.) nothwendig erfahren müssen.

Zählen wir nun auf unserer Strecke die Eindrücke unseres Wachscylinders und beginnen mit 4. Wir zählen 4096 Eindrücke; von der Tiefe 3 finden wir 3072, von jener der Tiefe 2 = 2560, endlich von den (tiefsten) Eindrücken 1 = 512. Den Zahlen dieser Eindrücke zufolge begleitet

den Grundton	c^1 =	512	Schw.	
der 5. Theilton	(e^3) =	2560	»	
» 6. »	(g^3) =	3072	»	und
» 8. »	(c^4) =	4096		

und es befinden sich demnach auf der Strecke von

10 Centimeter = 10240

(richtig 8704 [1])) in der Zeit einer Secunde erfolgte Eindrücke, welche uns aus ihren relativen Tiefen erkennen lassen, dass der Trompetenklang nebst dem Grund- (= 1. Theil-) tone aus dem 5., 6. und 8. Theiltone zusammengesetzt, also von hohen Partialtönen begleitet ist, und dass der 6. diesen Klangton besonders charakterisirt. — Es ist dies, wie gesagt, eine Supposition.

Nehmen wir nun aber an, unser Apparat fixire auf dieser Strecke einen Orchesteraccord, von 20 Instrumenten ausgeführt, deren jedes eine andere, aus durchschnittlich drei Partialtönen gebildete Klangfarbe hat, und welche in Tonlagen zwischen dem grossen und dem dreimal gestrichenen *c* vertheilt sind, — und nun muthen Sie Ihrer Vorstellungskraft zu, sich ein Bild zu machen von den, in einer Secunde auf einer Strecke von 10 Centimeter von dem Schreibstifte der Membrane in den Cylinder eingedrückten, verschiedenartigsten, von der Membrane reproducirten Vertiefungen, ein Bild von dem Schwingungszustande dieser Membrane, sowie des von ihr in den gleichen Zu-

---

[1]) Diese Reduction hat ihren Grund darin, dass jeder 5. Eindruck des e^3, jeder 6. des g^3 und jeder 8. des c^4 mit jedem Eindrucke des Grundtones zusammenfällt.

stand versetzten Trommelfelles, welches gleichzeitig erfolgende Impulse von 20 Klängen, deren jeder mit seinen Obertönen eine, der obigen Zahl der des Trompetenklanges bildenden Impulse mindestens gleichkommende Zahl von Schwingungen vollführt, auffasst und unterscheidet — und dann sage man, es gäbe keine Wunder mehr.

Stellt man sich aber auch auf den Standpunkt des *nil admirari*, so darf Edison's Phonograph doch sicherlich als der vollendetste Nachbildner, als der erschöpfendste Darsteller und Erklärer des mechanischen Theiles der Functionen des Trommelfelles unseres Gehörorganes bezeichnet werden. —

Zu unserem eigentlichen Gegenstande, der Verbreitung des Schalles, zurückkehrend, sei erinnert, dass wir einen Theil unserer bezüglichen Betrachtungen, nämlich die jener Fälle, in welchen wir bei unveränderter Intensität der Schallquelle stärkere Gehörseindrücke erhalten, erledigt hatten.

Wir gelangen nun zu dem, was wir objective Schallstärke nannten, nämlich zu allen jenen Fällen, in welchen eine reale Zunahme der Intensität platzgreift, und wollen uns den letzten Grund, das Bedingende dieser Erscheinung, klar machen.

Aus unseren Erfahrungen wissen wir, dass, wenn eine bestimmte Taste des Klaviers einmal schwächer, einmal stärker angeschlagen, oder derselbe Ton auf der Geige einmal schwächer, einmal wieder stärker angestrichen wird, oder wir in ähnlicher Weise mit der Harfe, mit Blasinstrumenten oder mit unserer Stimme verfahren, der Ton schwächer oder stärker sein wird, die Höhe aber unverändert bleibt.

Betrachten wir eine stärker angeschlagene oder gestrichene oder gerissene (gezupfte) Saite, so sehen wir, dass ihre Excursionen bei schwacher Erregung kleiner, bei starker grösser sind. Aus dieser Beobachtung schliessen wir nothwendig, dass die Amplitude der Schwingungen es ist, welche die Stärke des Tones bestimmt, und zwar dadurch, dass die grössere Excursion die Energie der Verdichtungen und Verdünnungen der Schallsphären steigert.

Die Molecule drängen sich in der Verdichtung enger aneinander, und bilden demnach in den Verdünnungen unter sich grössere Abstände, wodurch die Impulse auf das Gehör vermöge der grösseren Druckdifferenzen stärker werden müssen, weil sie das Trommelfell in kräftigere Schwingungen versetzen.

Da wir den abklingenden Ton einer durch einen Schlag oder Stoss primitiv erregten Schallquelle, wie Saite, Stimmgabel, Platte, Glocke u. s. w. zunehmend schwächer hören, und im gewissen Falle, wie z. B. an einer längeren Saite, zugleich mit dem Auge wahrnehmen, dass, je schwächer der Ton wird, auch die Excursionen kleiner werden, ohne dass sich die Tonhöhe ändert, so ist damit bewiesen, dass die Schallsphären, gleichviel ob die Impulse stärker oder schwächer, die gleichen Abstände einhalten, die ihnen, den Schwingungszeiten des oscillirenden Körpers entsprechend, zukommen und in diesen Zeitabständen an unser Ohr gelangen, und dass nur die Verdichtungen geringer werden, nämlich die Amplituden abnehmen, die Schwingungszahlen aber unverändert bleiben. —

Die Unabhängigkeit der Schwingungszahl von der Tonstärke hat übrigens nur innerhalb bestimmter Grenzen Geltung, über welche hinaus allerdings eine Beeinflussung der Tonhöhe stattfindet. So geben sehr stark angeschlagene, gerissene oder gestrichene Saiten, wegen der Verlängerung in Folge der Spannungs-Dehnung im ersten Momente einen tieferen Ton, ebenso Zungen, deren Schwingungen durch einen übermässigen Luftdruckwiderstand verlangsamt werden. Auch Membranen, Platten, Stäbe und selbst Stimmgabeln können durch Erregung grösserer Amplituden im Tone momentan vertieft werden, und es liegt sonach auch hier die Analogie mit dem Pendel zu Tage, dessen Schwingungen, wie bekannt, nur bis zu einem gewissen Elongationswinkel isochron sind. Der umgekehrte Fall tritt bei Luftsäulen (Pfeifen) ein, die durch stärkeres Anblasen höher werden, aus Gründen, die wir seinerzeit werden kennen lernen.

Im Allgemeinen aber darf als Axiom ausgesprochen werden, dass die Intensität des Schalles von der Weite der Schwingungen, d. h. von der Stärke der Verdichtungen abhängt, während die Tonhöhe durch die Zeitabstände bestimmt wird, in denen die Schwingungen, beziehungsweise die Verdichtungs- mit ihren Verdünnungssphären einander folgen. —

Nun gibt es aber eine Gattung tönender Körper, und sie gehören gerade zu den wichtigsten, denen sich ungeachtet der grösstmöglichsten Elongation, die wir ihren Schwingungen ertheilen, eine erhebliche Intensität des Schalles nicht nur nicht abgewinnen lässt, sondern die zu den tonärmsten Schallquellen gehören würden, wenn

den Mängeln, die in dieser Hinsicht ihre Form mit sich bringt, nicht auf andere Weise zu Hilfe gekommen würde, wodurch sie zu den wichtigsten und vorzüglichsten Tonquellen werden, die in der Instrumentalmusik unbestritten den führenden Rang einnehmen.

Es sind dies die fadenförmigen, durch Spannung elastischen Körper, die man gemeinhin Saiten nennt. Es gehören aber nicht minder auch alle anderen durch innere Steifigkeit elastischen Körper hieher, die der vorgedachten Hilfe umsomehr bedürfen, je mehr sie sich der Fadenform nähern, d. h. je mehr ihre Gestalt an Oberfläche einbüsst und an Länge zunimmt, so Stäbe, Zungen, Stimmgabeln, Maultrommeln, Ringe u. dgl.



Fig. 72.

Diese an der Zimmerdecke vermittels zweier Schnüre und eines eisernen Querstückes befestigte, durch ein Gewicht gespannte, frei herabhängende Metallsaite (Fig. 72) liefert Ihnen ein Beispiel des Gesagten. Versetzen wir sie durch einen noch so starken Bogenstrich oder Anschlag, oder durch Zerrung in Schwingung, so werden Sie doch kaum einen Ton hören. Der Grund beruht sowohl in diesem wie in jedem anderen ähnlichen Falle darin, dass der Körper eine zu kleine Oberfläche hat, die Menge der Lufttheilchen, die er durch seine Bewegung trifft, mithin eine zu geringe ist, um intensivere Verdichtungssphären zu erzeugen und dadurch kräftige Impulse auf unser Gehör auszuüben.

Wenn wir aber Mittel anwenden, um die Schwingungen dieser Körper auf grössere Flächen zu übertragen, die geeignet sind, die gleichen Schwingungen zu vollführen und dadurch ausgebreiteteren Partien der Luft die empfangenen Impulse mitzutheilen, so werden kräftige Schallwirkungen das Resultat sein, wie wir uns sofort überzeugen können, wenn wir unsere Resonanzplatte (Fig. 64) mit einem der Befestigungspunkte unserer Saite in Berührung bringen.

Man nennt diese Erscheinung Resonanz, und ich werde diese Bezeichnung beibehalten, wiewohl meiner Meinung nach im vorliegenden Falle Revibration der zutreffendere Ausdruck wäre, da es sich hier nicht um ein Mittönen, sondern um ein Mitschwingen handelt, während die eigentliche Resonanz, das Mittönen, doch nur dort stattfindet, wo der mitschwingende Körper zugleich mit seinem Eigentone auftritt, was beim blossen Mitschwingen nicht der Fall ist. — Ich will Ihnen den Unterschied zwischen Mitschwingen und Mitklingen an einer Reihe von Beispielen klar zu machen versuchen.

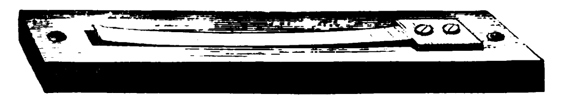


Fig. 73.

Eine freie Zunge (Fig. 73), wenn sie durch Zerrung in Schwingung versetzt wird, hat in Folge ihrer geringen Oberfläche, mit der sie also, gleich einer freien Saite, nur ein kleines Luftquantum treffen kann, einen äusserst schwachen Klang. An die Tischplatte gedrückt und in gleicher Weise erregt, wird der Ton bedeutend vernehmbarer. Es ist dies die Folge des Mitschwingens der Tischplatte. Wird aber die Zunge mit einem gleichgestimmten

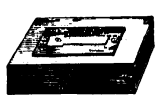


Fig. 74.

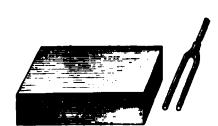


Fig. 75.

Klangkästchen verbunden (Fig. 74), so werden Sie — bei gleicher Erregungsart wie zuvor — einen äusserst kräftigen Klang, die Folge des Mittönens der vom Kästchen gebildeten Luftsäule, vernehmen.

Ich versetze diese freie Stimmgabel in Schwingung. Der Ton ist fast unhörbar. Ich bringe sie — wie zuvor die Zunge — mit der Tischplatte in Verbindung; der Ton wird, gleichwie im vorigen Falle, lauter. Nun errege ich die Gabel nochmals und nähere sie, völlig frei, der Mündung eines Klangkästchens (Fig. 75). Wir vernehmen jetzt einen sehr lauten, ja weit kräftigeren Klang, als bei der directen Erschütterung der Tischplatte.

Dies kommt daher, weil der Eigenton des Kästchens erregt wurde und nun mittönt. Wir haben durch den Klang der Gabel die Luftsäule zum Schwingen veranlasst, also nicht wie im früheren Falle bei der Zunge durch materielle Erschütterung des mit der vibrirenden Zunge verbundenen Kästchens, sondern lediglich durch die von den Gabelzinken erregten Schallwellen.

Bringen wir nun Gabel und Kästchen in feste Verbindung, so wird der Fall des geichzeitigen Mitschwingens und Mittönens eintreten, und aus diesem Zusammenwirken die grösste relativ erzielbare Tonstärke resultiren. —

Wir haben früher blos durch den schwachen Ton der freien Gabel den Luftraum des Kästchens zum Mittönen vermocht. Aber wir bewirkten damit noch mehr, denn wir haben zugleich auch die Wände des Kästchens zum Mitschwingen und sonach durch den Ton allein die spröde Materie des Holzes zu Bewegungen gezwungen. Dass dem so ist, zeigt Ihnen folgendes Experiment.

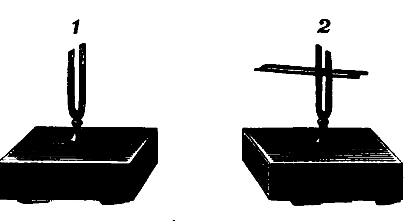


Fig. 76.

Stellen wir zwei, mit gleich gestimmten Gabeln versehene Kästchen (Fig. 76), die wir mit 1 und 2 bezeichnen wollen, in einiger Entfernung von einander auf und machen die Gabel 2 ertönen. Ersticke ich auch sogleich deren Ton, so werden Sie nichtsdestoweniger den gleichen Ton fortklingen hören. Derselbe rührt von dem Kästchen 1 her. Dasselbe hat, als sein Eigenton durch den seines Gegenüber (2) geweckt wurde, wodurch seine Wände in Erschütterung geriethen, diese Erschütterungen auf die mit ihm verbundene Gabel übertragen. Wir überzeugen uns hievon, wenn wir ein Pendelchen mit der Gabel 1 in Berührung bringen (Fig. 77) und die Gabel 2, wie früher, erklingen machen und sofort dämpfen. Das Pendelchen wird heftig weggeschleudert, oder, wenn es zwischen den Zinken hängt, hin- und hergeworfen werden; ein Beweis, dass die Gabel schwingt und zwar in Folge der auf sie übertragenen Vibrationen ihres Kästchens, welche Vibrationen wiederum eine Folge der durch den Klang des Vis-à-vis geweckten Resonanz des Eigentones der vom Kästchen umschlossenen Luftsäule sind.

Die Erscheinung der gegenseitigen Einwirkung dieser beiden Gabeln kann abwechselnd wiederholt werden, indem man bald die eine, bald die andere Gabel dämpft.

Dass, wenn beide Gabeln klingen, eine noch bedeutendere Verstärkung des Klanges erfolgt, bedarf keines weiteren Beweises.

Alle diese Erscheinungen finden nicht statt, sobald der Einklang der Gabeln gestört wird. Diese das Resonanzgesetz gleichsam bestätigende Gegenprobe können wir sogleich anstellen. Wir brauchen nur die Zinke einer dieser Gabeln mit einem Gewichtchen oder durch Ankleben eines Stückchen Wachses zu beschweren und dadurch ihre Schwingungen zu verlangsamen. Es genügt eine Differenz von wenigen Schwingungen, um die gegenseitige Einwirkung ganz aufzuheben.

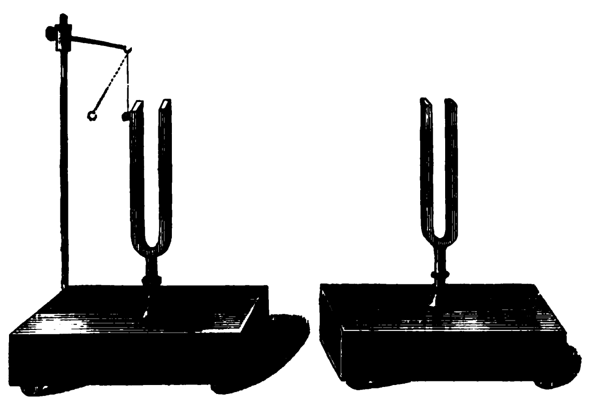


Fig. 77.

Noch ein interessantes, hier einzureihendes Experiment möchte ich Ihnen vorführen. Wir haben früher (Fig. 63) eine, mit Leitstab und Scheibe versehene Gabel durch den leisen Hauch des Mundes zum Tönen gebracht. Es war dieses eine sehr zarte, aber doch mechanische Erregungsart, der Stoss einer, immerhin mit einiger Gewalt vorgetriebenen Luftmasse. Wir wollen diese Erregung jetzt aber durch Schallstrahlen, nämlich durch den Ton selbst versuchen, wobei bekanntlich die Luftmasse nahezu unbewegt bleibt, weil die Oscillationen derselben sich nur auf die Entfernung von einer Moleculeschichte zur anderen erstreckten. Wir erregen diese auf einem Kästchen montirte Gabel, bringen aber unsere Gabel nicht in die Schallsphäre der klingenden Gabel selbst, sondern in jene des durch

sie geweckten Eigentones des Kästchens, also in die Sphäre einer tönenden Luftsäule (Fig. 78). Wir ersticken nun den Ton der letzteren, indem wir die Schwingungen der mit dem Kästchen verbundenen Gabel hemmen, unsere Versuchsgabel aber klingt.

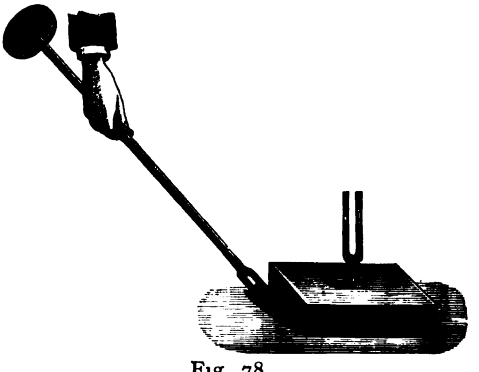


Fig. 78.

Auch die Luftstösse einer rotirenden Sirenenscheibe *m* (Fig. 79) können den Eigenton einer Röhre wecken. Wird die Scheibe von unten angeblasen und über derselben — dem Anblaseröhrchen *a* gegenüber — eine offene oder gedeckte Röhre *r* gehalten, so wird, sobald der Sirenenton mit dem Eigentone der Röhre übereinkommt, letzterer sich kräftig hören lassen.

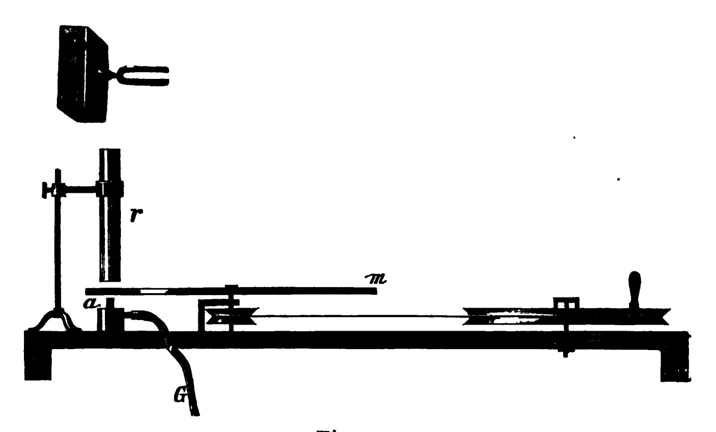


Fig. 79.

Setzt man statt der Röhre ein mit einer Stimmgabel versehenes Klangkästchen den Luftstössen der Sirene aus, so wird in gleicher Weise der Eigenton des Kästchens, dadurch aber auch zugleich die Gabel selbst — sobald ihr Ton mit jenem des Kästchens übereinstimmt — zum Tönen gebracht werden.

9. Vortrag.

(Schallkörper. — Resonanzflächen. — Resonanzräume.)

Von den beiden Arten der Resonanz, die wir letzthin kennen ernten, dem Mittönen und dem Mitschwingen, ist letztere die weitaus wichtigere. So beruht auf ihr allein die Möglichkeit, gespannte Saiten in der Musik überhaupt, aber zugleich auch in einer solchen Vollendung zu verwenden, dass sie als Tonerreger allen anderen vorangehen. Es sei diesfalls nur an den Rang erinnert, welchen die Streichinstrumente im Orchester, in der Kammermusik, als Soloinstrumente einnehmen, und an jene dominirende Stellung, welche das Clavier durch seine Universalität und Literatur behauptet und wohl immer behaupten wird.

Wie die menschliche Seele des Körpers bedarf, um sich in dessen verschiedenartigsten Functionen zu äussern, so ist es beim Saiteninstrumente der Resonanzkörper, der die unhörbaren Impulse der schwingenden Saite in weithin hörbare verwandelt. Man nennt denn auch sehr zutreffend den Theil der Streichinstrumente, dem die Aufgabe der Resonanz zufällt, Corpus. — Der diese Rolle beim Clavier übernehmende Theil wird Resonanzboden und bei der Harfe Resonanztafel (tâble) genannt.

Zwischen den Resonanzkörpern der Streichinstrumente und jenen des Claviers und der Harfe obwaltet ein gewisser Unterschied, indem die Körper der ersteren Hohlräume bilden, was bei letzteren nicht der Fall ist. Da nun jeder Hohlraum seinen Eigenton hat, so frägt es sich, ob hier nebst dem Mitschwingen nicht zugleich ein Mittönen platzgreift.

Von einem Mittönen im eigentlichen Sinne kann nicht wohl die Rede sein, weil dasselbe nur dort eintreten kann, wo ein bestimmter Ton verstärkt werden soll. Dies wird aber bei Streichinstrumenten keineswegs beabsichtigt, ja es wäre sogar ein arger Fehler, weil dadurch ein einziger Ton allen anderen gegenüber begünstigt würde, während doch die Güte eines Instrumentes darin besteht, diesfalls in allen Lagen möglichst gleich zu sein.

Hohlräume mit bestimmtem Eigenton, wie es Röhren und Klangkästchen sind, eignen sich daher auch nicht zu Resonanzkörpern

für Instrumente, die bestimmt sind, eine Reihe von Klängen verschiedener Tonhöhen hervorzubringen. Wollte man aber solche Instrumente mit so vielen Resonanzräumen versehen, dass für jeden auf denselben ausführbaren Ton ein solcher genau abgestimmter Raum vorhanden wäre (von der Veränderlichkeit der Stimmung ganz abgesehen), so würden dieselben ganz monströse Dimensionen bekommen, von welchen Ihnen eine Vorstellung zu geben, wenige Zahlen genügen. Das Klavier umfasst heute 9 Octaven, d. h. 109 Töne, wovon der tiefste das sogenannte 32-füssige A_2, als Klangrohr einen Schlauch von 19·2 Fuss Länge und von einer solchen Weite erfordern würde, dass ein kleines Kind denselben bequem durchschliefen könnte.

Dass die von den Körpern der Streichinstrumente (auch die Zither, Guitarre, Laute, Mandoline u. dgl. zählen hieher) eingeschlossene und durch die sogenannten f-Löcher (oder sonst geformte Ausschnitte) mit der Atmosphäre communicirende Luft zur Verstärkung und insbesondere zur Modification des Tones wesentlich beiträgt, unterliegt keiner Frage: den Cardinalpunkt aber bei allen diesen Instrumenten bildet die Uebertragung der Schwingungserschütterungen der Saite auf möglichst grosse mitschwingende Flächen. Je grösser diese sind, umsomehr sind sie geeignet, Tonreihen von grossem Umfange zu verstärken.

Bevor wir fortfahren, soll die Art, wie sich Schallschwingungen auf mitschwingende Flächen übertragen, durch einige Versuche illustrirt werden.

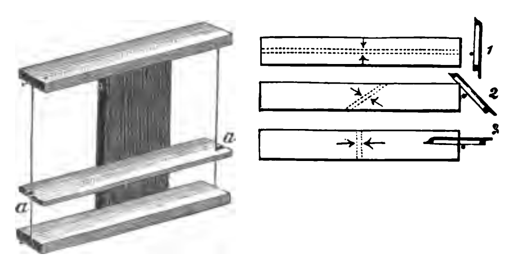


Fig. 80.

Wird ein dünnes Brettchen in horizontaler Lage zwischen zwei Saiten geklemmt (Fig. 80 *aa*) und dasselbe mit etwas Sand bestreut, so wird letzterer, sobald wir eine der Saiten durch Bogenstrich in Schwingung versetzen, sich zu Linien ordnen, die, je nach dem Winkel, in welchem wir den Strich führen, eine andere Lagerung zeigen. Streichen wir die Saite in der Längsebene des Brettchens (3), so

schwingt dieses in der Längsrichtung und der Sand bildet, — senkrecht auf letztere, — Querlinien.

Wird die Saite rechtwinklig zum Brett gestrichen (1), so wird letzteres Querschwingungen vollführen, und der Sand sich längs des Brettchens zu einer Mittellinie sammeln. Führen wir aber den Bogen in einer Richtung, die zwischen den beiden vorgenannten die Mitte hält, so wird die Sandlinie sich ebenfalls schief lagern, bedingt durch die, weder in die Längs- noch in die Querlinie fallende Erschütterungsrichtung der Saite (2). Zugleich zeigt dieser Versuch, einmal, dass sich bei der Uebertragung von Vibrationen Längs- in Querschwingungen, und umgekehrt, umsetzen lassen, und dann (was für Spieler von Streichinstrumenten von praktischer Wichtigkeit), dass die Art der Bogenführung auf das mehr oder minder volle Mitschwingen der Resonanzflächen, und demnach auf die Schönheit und Fülle des Klanges von entschiedenem Einflusse ist.

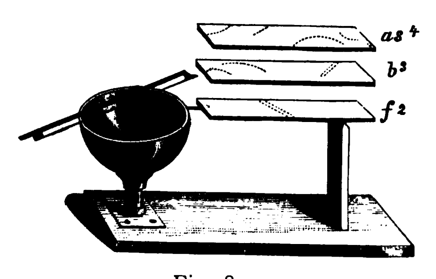


Fig. 81.

Dass die Zahl der auf einer mitschwingenden Fläche sich bildenden Knotenlinien von der Ordnungszahl des betreffenden Obertones, oder im Allgemeinen von der Schwingungszahl des betreffenden Tones abhängt, zeigt folgender Versuch mit einem Brettchen, das durch die transversalen Schwingungen einer am Rande mit dem Bogen gestrichenen Glocke (Fig. 81) in Längsschwingungen versetzt wird. Bei jedem folgenden Obertone, den wir durch passendes Streichen und Dämpfen des Glockenrandes hervorrufen, werden sich die Sandlinien vermehren und zugleich eigenartig ordnen, wie dies aus obiger Figur zu ersehen.

Kehren wir nun wieder zum eigentlichen Gegenstande zurück.

Zu den Schallquellen, deren Klangarmuth durch Resonanzräume verstärkt werden muss, gehören gespannte Membranen, dann Stäbe und Zungen, deren Schall durch Zerrung oder Stoss erregt wird.

Die Maultrommel beispielsweise — ein Mittelding zwischen Stab und Zunge — ist ganz tonlos, insolange sie nicht mit der als Resonanzraum wirkenden Mundhöhle in Verbindung gebracht wird.

Die Tonfolgen, die man nun hervorrufen kann, und die dem Gesetze der Obertöne, das wir später werden kennen lernen, genau entsprechen, entstehen dureh Erweiterungen oder Verengerungen dieses Resonanzraumes, dessen durch den Grundton der Maultrommel geweckte Eigentöne sie sind.[1])

Instrumente dagegen, welche auf der tönenden Luftsäule beruhen, wie die Labialpfeifen und Blasinstrumente, müssen einer Tonverstärkung durch mittönende Räume entrathen, weil diese, wenn sie dem Instrumente so nahe angebracht wären, um zu wirken, deren Schwingungen hemmen würden, in weiterer Entfernung aber ihr Effect gleich Null wäre, wie man sich an grösseren Orgeln überzeugen kann, wenn man eine Pfeife tönen lässt und die übrigen gleich gestimmten abwechselnd schliesst und öffnet; man wird keine Aenderung in der Tonstärke wahrnehmen.

Der eigentliche Grund dieser Erscheinung beruht darin, dass bei allen Instrumenten, deren tönendes Princip die Luftsäule ist, Ton- und Resonanzkörper zusammenfallen. Dagegen lassen sich durch gleich gestimmte Resonanzräume Töne verstärken, welche durch Schwingungen steifer, elastischer — wie Zungen, Platten, Membranen — oder durch Stösse nicht schwingender Körper, wie Zahnräder oder Sirenenscheiben, erzeugt werden. Ein Beispiel letztgenannter Art wurde Ihnen zuvor mit der von unten angeblasenen Sirenenscheibe und der darüber gehaltenen Röhre vorgeführt.

Ein Beispiel erster Art aber liefert die nächstbeste Zungenpfeife, einmal mit und dann ohne Schallkörper angeblasen.[1])

Verfolgen wir nun unsere Betrachtungen über die Resonanz weiter.

Die Gesetze, nach welchen die Resonanzflächen, dann die für vieltönige Instrumente geeigneten Hohlräume beschaffen sein müssten, sind auf rein empirischem Wege gefunden worden. Behufs der theoretischen Begründung dieser secundären Schwingungsformen, die bisher nur auf bestimmte Fälle sich erstreckte, hat es die Wissenschaft zu einer allgemeinen und einfachen Formel, wie beispielsweise für die Schwingungen der Saiten und der Luftsäulen, noch nicht zu bringen vermocht. Im Allgemeinen ist hierüber Folgendes zu sagen.

---

[1]) Wird demonstrirt.

Bei Instrumenten, deren Tonerregung (wie beim Clavier, beim Cymbal, bei der Harfe, Zither, Guitarre) durch Schlag oder Zerrung erfolgt, sollen die Resonanzflächen theoriegemäss eine solche Ausdehnung haben, um Schwingungen sich anzupassen, die dem tiefsten Tone entsprechen. Dass dieser Anforderung nur das Clavier, im geringeren Grade die Harfe, im geringsten die Zither entspricht, ergibt sich schon aus der Gestalt dieser Tonwerkzeuge im Verhältnisse zu ihrem Tonumfange.

Zitherspieler suchen gegen die Kleinheit der Resonanzfläche ihre Instrumente, zumal mit Rücksicht auf die Tiefe der Basstöne, in den sogenannten Resonanztischen Abhilfe, auf welche sie das Instrument stellen. — Der Körper der Harfe bildet aus diesem Grunde bereits eine Art tonverstärkenden Hohlraumes; die Zither und Guitarre aber stellen gleichsam schon eine Uebergangsform zu dem Bau der Streichinstrumente dar, indem sie einen förmlichen, allseitig abgeschlossenen und nur durch eine verhältnissmässig kleine Oeffnung mit der Aussenluft communicirenden Hohlraum besitzen.

Die wesentlichen Bedingungen einer richtig functionirenden Resonanzplatte sind: möglichste Elasticität und zugleich jener Grad von Widerstandsfähigkeit, um dem Drucke, welchen die Spannung der Besaitung ausübt, gewachsen zu sein. Und dieser Druck ist nicht gering. Er entspricht bei unseren heutigen Clavieren einer Last von 11.000 Kilogrammen = 220 Centnern; bei der Violine von $28^1/_2$ Kilogrammen; bei der Viola von 31 Kilogrammen; beim Violoncell von 45 Kilogrammen; und beim Contrabasse von 200 Kilogrammen.

Um solcher Belastung zu widerstehen, müssen die Resonanzplatten Verstärkungen erhalten, die jedoch die Schwingungen der Platten nicht behindern dürfen, ein Punkt, der als der wichtigste und zugleich schwierigste im Instrumentenbau bezeichnet werden muss. Die natürlichste dieser Verstärkungen besteht darin, dass man den Platten Formen gibt, damit die angrenzenden Theile einander stützen. Dies geschieht durch bogenförmige Spannung der Platten. Wo dieses Mittel nicht ausreicht, bildet die sogenannte Berippung eine weitere Verstärkung, die bei Streichinstrumenten nur in der Richtung der Holzfaser — man nennt eine solche Rippe den Basssteg, — bei Clavieren aber auch quer zur Fasernrichtung angewendet wird.[1])

---

[1]) Wird an dem offenen Körper einer Geige und am Claviere demonstrirt.

Bei allen Saiteninstrumenten ist es der auf dem Resonanzkörper ruhende Steg, der die Schwingungen der Saite auf die mitschwingenden Flächen überträgt.

Bei den Streichinstrumenten theilt sich die vom Stege[1]) *St* (Fig. 82) ausgehende Erschütterung der oberen Platte (Decke) *De*, mittelst des sogenannten Stimmstockes (Seele) *S*, der unteren Platte (dem Boden) *Bo* mit.

Die Hohlräume der Streichinstrumente sind auf das vergleichsweise Verhalten ihrer Dimensionen hin, wie auf ihren Eigenton, und dessen Einfluss auf den Klangcharakter wissenschaftlich untersucht worden. Es hat sich jedoch nach keiner Richtung eine bestimmte Gesetzmässigkeit ergeben.

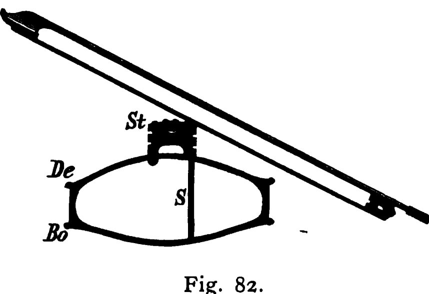


Fig. 82.

Nimmt man die Violine zum Ausgangspunkte der Untersuchung und Vergleichung, so findet man, dass der Eigenton des Hohlraumes, den man bei leisem Klopfen auf die Decke deutlich vernimmt, je nach der gekrümmteren oder flacheren Wölbung, sowie nach der grösseren oder geringeren Höhe der sogenannten Zargen, zwischen des^1 und es^1 variirt. Instrumente ersterer Art werden dumpfer, die der letzteren Art heller, und, je nach der Ausarbeitung der einzelnen mitschwingenden Theile, sonorer oder näselnder klingen.

Vergleicht man nun den Bau der Viola mit dem der Violine, so sollten, da ihre Stimmung eine Quinte tiefer steht, deren Dimensionen das Verhältniss von 3 zu 2 haben, d. h. die Viola müsste in jeder Hinsicht um ein Dritttheil grösser sein, als die Geige.

Dies ist nun durchaus nicht der Fall, und kann es auch aus dem einfachen, praktischen Grunde nicht sein, weil ein solches Instrument nicht mehr in der Art der Violinen gehalten und gespielt werden könnte, sondern gleich dem Violoncell zwischen die Kniee

---

[1]) Der Violavirtuose Hermann Ritter hat einen dreifüssigen Steg empfohlen.

genommen werden müsste. Der Eigenton müsste zwischen *ges*^{0} und *as*^{0} variiren, während er in der That eine Terz höher steht. Der kleinere und flachere Bau des Corpus der Viola bedingt deren näselnden Ton, durch welchen sie mit dem Violinklange einerseits, und dem Violoncellklange andererseits wirkungsvoll contrastirt.

Die Maasse des Violoncells sind gegenüber der Viola, wie gegenüber dem Contrabasse zu gross; letzterer würde bei angestrebter Vergrösserung völlig unhandsam werden.

Wer sich über den Bau der Saiteninstrumente ausführlicher informiren will, dem seien die einschlägigen Werke von Pelissov und Zamminer ihrer klaren und leichtfasslichen Darstellung wegen empfohlen. —

Die Verhältnisse der Längen, Dicken und Spannungen der Saiten selbst werden wir an betreffender Stelle eingehender betrachten.

Hier sollen dieselben nur insoweit berührt werden, als sie mit der Frage der Schallstärke zusammenhängen.

Spannen wir eine Saite von bestimmter Länge mittels eines bestimmten Gewichtes, so erhalten wir einen Ton von bestimmter Tonhöhe und — worauf es bei unserem Thema zunächst ankommt — von bestimmter Stärke. Theilen wir nun die Saite durch Unterlegen eines Steges in zwei gleiche Theile, so wird jeder dieser Theile einen um eine Octave höheren Ton vernehmen lassen, wie wir uns in der Folge davon thatsächlich überzeugen werden.

Wollen wir aber mit der ganzen Länge der Saite einen Ton von derselben Höhe, wie ihn jede dieser Hälften hören lässt, hervorbringen, so müssen wir das spannende Gewicht vermehren, und zwar zufolge eines Gesetzes, das wir später werden kennen lernen, in diesem Falle vervierfachen.

Dass der auf diese Art erzielte Ton stärker sein wird, als der gleiche durch die halb so lange Saite hervorgebrachte, ist einleuchtend, und die Gründe sind es für Sie nicht minder.

Denn, machen auch diese beiden (halben) Saitenlängen, weil sie von gleicher Tonhöhe sind, dieselbe Anzahl von Schwingungen in derselben Zeit, so ist es vor Allem die doppelt so grosse Luftmasse, welche durch die Excursionen der doppelt so langen Saite getroffen wird, abgesehen von der grösseren Energie, mit der die

straffere Saite einestheils die Luftmolecule von sich stösst und verdichtet, anderntheils ihre Schwingungsimpulse auf den Resonanzkörper überträgt.
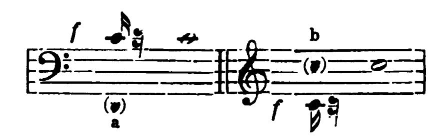
Dem Bestreben, durch fortgesetzte Spannung die Vermehrung der Schallkraft einer Saite zu erzielen, ist durch die Cohäsionskraft des betreffenden Materiales selbstverständlich eine Grenze gezogen, bei deren Ueberschreitung die Saite reisst. Diese Grenze dürfte im heutigen Clavierbau so ziemlich erreicht sein, wo es bereits der gewaltigsten Eisenconstruction bedarf, um den enormen Spannungen der immer stärker und länger gewordenen Besaitung zu widerstehen, Spannungen, auf welchen hauptsächlich die grosse Schallkraft der modernen Claviere beruht, und die man als einen Triumph der Industrie unserer Zeit bewundern muss, wenn man sie mit den, mit dünnen, kurzen, schwach gespannten Messingsaiten versehenen, schallarmen Flügel- und Querclavieren vergleicht, wie sie vor einem halben Jahrhunderte, ohne eine Spur von Eisenconstruction, gebaut wurden, und wovon sich Exemplare noch häufig vorfinden und auch in unserem Museum vorhanden sind. Der Aufschwung datirt hauptsächlich von der Herstellung der, enorme Spannungen aushaltenden Gussstahlsaiten, die wiederum zu einem immer kräftigeren Bau der Kästen nöthigten, und, als alle Holzconstructionen sich endlich zu schwach erwiesen, zu den Eisenrahmen, die nun die ganzen Spannungslasten tragen, und, um grössere Saitenlängen zu ermöglichen, zum kreuzsaitigen Bezug führten.

Noch zwei Kategorien objectiver Schallverstärker haben wir zu betrachten: 1. das Mittönen gleich gestimmter elastischer Körper; 2. das Mittönen sogenannter Partial- oder Obertöne, die in fast allen Klängen enthalten sind, und nach den epochemachenden Entdeckungen von Helmholtz dasjenige bilden, was wir Klangfarbe nennen und wodurch wir im Stande sind, gleich hohe Töne verschiedener Tonquellen zu unterscheiden.

Das Mittönen ersterer Art lässt sich leicht nachweisen. Erregt man bei gehobenem Dämpfer eine Seite im Clavier durch Zerrung und dämpft sie sogleich mit dem Finger, so werden die beiden anderen Saiten desselben Chores nachtönen; oder man legt auf die letzteren leichte Papierschnitzel, die beim Ertönen der ersten Saite durch die Resonanzvibration abgeworfen werden.

Was das Mitklingen der sogenannten Obertöne betrifft, so bildet diese Erscheinung einen der wichtigsten Punkte der Akustik, dem wir aber erst später eine eingehende Betrachtung widmen können.

Vorläufig soll Ihnen von dieser Erscheinung eine Probe am Clavier eine Vorstellung geben.



Heben wir den Dämpfer (*a*) der Taste F_0 und schlagen das c^1 kurz und kräftig an, so wird dieses c^1 nachtönen; dass es aber die Saiten des F sind, auf welchen das c^1 nachtönt, erkennt man sofort, wenn man entweder Papierreiter auf die F-Saiten setzt oder diese Saiten dämpft. Heben wir den Dämpfer (*b*) der Taste c^2 und schlagen das c^1 an, so wird das c^2 ertönen. Damit ist erwiesen, dass das c^1 im F_0 als Oberton enthalten ist und das c^2 einen Oberton von c^1 bildet. —

Dass fast jeder Klang eine Reihe höher liegender Töne in sich schliesst, die zugleich mit ihm er- und verklingen, und dass man solche Reihen dort, wo sie fehlen, aber zur Bildung einer bestimmten Tonqualität erfordert werden, künstlich herstellen kann, wie solches bei den sogenannten gemischten Orgelstimmen (Mixturen, Cornette Progressio u. dgl.) der Fall ist, sei einstweilen nur nebenher bemerkt.

Dass Musik in geschlossenen Räumen stärker klingt, als im Freien, ist eine Erfahrung, die Jeder machen kann. Die Erscheinung erklärt sich einfach aus der schon erwähnten Reflexion oder Zurückwerfung des Schalles, wobei weder ein Mitklingen noch ein Mitschwingen stattfindet. Die hier waltenden, ganz bestimmten Gesetze werden wir alsbald aus der Betrachtung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles kennen lernen.

Zu unseren bisherigen Untersuchungen über das Schallleitungsvermögen der Körper haben uns Beispiele aus allen drei Aggregatzuständen gedient, in welchen die Körperwelt überhaupt zur Erscheinung gelangt: dem luftförmigen, dem tropfbarflüssigen und dem starren, indem wir vergleichende Versuche mit der Luft, mit Wasser und mit einem Holzstabe machten, die uns belehrten, dass das Wasser besser als die Luft, der Stab besser als das Wasser den Schall leiten.

Würden wir diese Versuche dahin ausdehnen (und in einer Richtung wird dies später zu geschehen haben), dass wir sie mit dichteren Aggregatsformen *desselben* Körpers anstellen, so würden wir finden, dass z. B. in den tropfbar-flüssigen Zustand übergeführtes kohlensaures oder Kohlenwasserstoffgas in diesem Zustande besser leitet, desgleichen Wasser, wenn es zu Eis geworden, und ebenfalls besser, wenn wir einen Stab aus Eichenholz durch einen Stab aus Eisen oder Glas ersetzen.

Durch alle unsere Beobachtungen sind wir nun in den Stand gesetzt, aus denselben eine Reihe allgemeiner Gesetze abzuleiten. Vor Allem können wir aussprechen, dass das relativ *dichtere* Mittel stets das *besser leitende* ist. Wir können weiters sagen, dass Körper von einer Beschaffenheit, die eine Schallerregung nicht ermöglicht, auch zur Fortleitung derselben nicht geeignet sind. Streng genommen gibt es keinen solchen Körper, denn, da sie alle eine *Consistenz* haben müssen, die mindestens jener der leichtesten Luftart gleichkommt, so ergeben sich die Folgerungen von selbst. Wolle, weiche Gewebe, Talg, Kautschuk, Schwämme, Sägespäne u. dgl. gehören hieher. Im Allgemeinen aber erweisen sich zur Schallleitung nur Körper tauglich, die geeignet sind, selbst Schall zu erzeugen, und das sind alle *elastischen* Körper, nämlich alle jene Körper, denen das Vermögen innewohnt, aus einer veränderten Lage *durch eigene* Kraft in die frühere zurückzukehren.

Als drittes Gesetz können wir aussprechen: Wenn begrenzte elastische Körper als Schallleiter dienen, so befördern sie immer nur den *empfangenen* und nie den eigenen Ton. Dieser muss besonders erregt werden. Es bilden sich also in dem *Schallleiter* nur fortschreitende und nie stehende Wellen, und es kann daher der fortgeleitete Ton auch keine Veränderung nach Höhe oder Tiefe erleiden, möge das fortpflanzende Mittel heissen und beschaffen sein, wie es will. Wenn der fortzuleitende Ton mit dem Eigentone des vermittelnden Mediums vollkommen übereinstimmt, dann tritt zwar auch das Moment der *Resonanz* hinzu, und es erfolgt eine *Verstärkung* des fortgeleiteten Tones, ohne jedoch die geringste Aenderung seiner Höhe zu bewirken. —

Unsere bisherigen Versuche, den Schall durch andere Medien zu leiten, haben sich auf *den einzelnen* Ton beschränkt.

Wir wollen für heute mit einem Experimente schliessen, das uns nebst dem Beweise, wie sehr andere Körper als schallleitende Medien der Luft überlegen sind, auch jenen erbringen wird, dass solche Medien selbst bei kleinsten Dimensionen enorme Tonmassen verschiedenster Höhe und Bewegung mit vollkommenster Genauigkeit und Klarheit gleichzeitig fortzuleiten vermögen. —

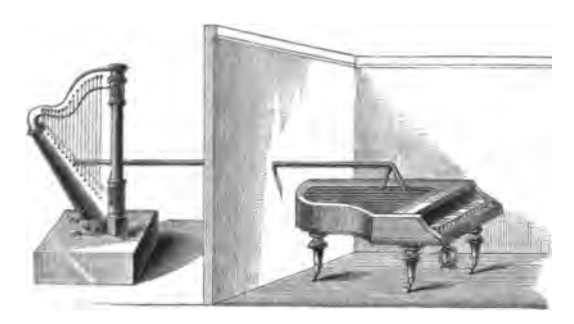


Fig. 83.

Dieser aus der Wand hervorstehende Tannenstab (Fig. 83) reicht in das Nebenzimmer und steht mit dem Resonanzboden eines Claviers in Verbindung. Es wird auf diesem gespielt. Sie hören nichts. Ich bringe jetzt diese Harfe mit dem Stabende in Berührung und die Harfe ertönt, wie von unsichtbarer Hand gespielt.

Was Sie hören, sind zwar die Töne des Claviers, deren Schwingungen der Stab auf die Resonanztafel der Harfe überträgt. Aber diese Erschütterungen theilen sich auch den mit dem Claviere gleichgestimmten Saiten der Harfe mit, durch deren Vibrationen die überleiteten Claviertöne die Färbung des Harfenklanges erhalten. —

Ersetzen wir die Harfe durch eine Geige oder Resonanzplatte, so wird uns der Stab das auf dem Claviere im Nebenzimmer Gespielte ebenfalls laut vernehmlich zuleiten.

Aber auch zarte Klänge, z. B. die einer Spieldose, wird unser Schallvermittler so deutlich, als befände sich die Schallquelle in unserer nächsten Nähe, hören lassen, sobald wir das Stabende mit einer Resonanzplatte, oder mit dem Boden einer Violine in Berührung bringen.

Wie sich die schallleitenden Mittel in Bezug auf die Schnelligkeit der Schallfortpflanzung verhalten, und auf welche Weise die numerische Bestimmung dieser Verhältnisse erfolgt — mit diesen ebenso wichtigen als interessanten Untersuchungen wollen wir uns das nächste Mal befassen.

---

10. Vortrag.

(Die Geschwindigkeit des Schalles.)

Von den drei Pässen, die wir zu überschreiten haben, um in das eigentliche Reich der Töne zu gelangen, sind zwei bereits von uns überwunden: die Verbreitung und Fortpflanzung, dann die Stärke des Schalles. Es bleibt uns nur noch eine Schranke zu übersteigen übrig: die Geschwindigkeit des Schalles. —

Aus unseren bisherigen Betrachtungen und Erfahrungen wissen wir zwar, dass aller Schall mit einer gewissen Geschwindigkeit im Raume fortschreitet, wir wissen auch, dass er sich in gewissen Medien schneller als in anderen fortpflanzt, und haben aus dem Vergleiche der Lichterscheinungen mit jenen des Schalles erkannt, dass sich der Schall weit langsamer verbreitet, weil wir schon bei verhältnissmässig kurzen Entfernungen wahrnehmen, dass Erscheinungen von Licht und Schall, von welchen wir ganz bestimmt wissen, dass sie gleichzeitig erfolgen, beispielsweise Schritt und Trommelschlag einer marschirenden Truppe, oder Blitz und Knall eines Schusses, nicht gleichzeitig zu unserer Wahrnehmung gelangen. — Um aber eine Reihe der wichtigsten Erscheinungen der Akustik zu erklären und zu begründen, ist es unerlässlich, das absolute Mass der Geschwindigkeit kennen zu lernen, mit welcher der Schall in verschiedenen Medien sich bewegt.

Dass man hiebei von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Luft den Ausgang nimmt, ist begreiflich, da diese ja der wichtigste, weil allgemeinste Schallvermittler ist.

Nun ist aber, wie wir dies bald klar erkennen werden, eine irgend zutreffende Bestimmung der Schallgeschwindigkeit gar nicht

möglich, bevor wir nicht den hiebei wesentlich mitbestimmenden Factor in Rechnung zu ziehen gelernt haben: die Wärme. —

Welche wichtige Rolle die Wärme im Haushalte der Natur wie im Dasein der Lebewesen spielt, ist bekannt. Sie hinweg gedacht, träten Erstarrung und Tod auf dem Erdballe sofort ein. — Von verhältnissmässig ebenso grosser Bedeutung ist die Wärme für die Welt der Klänge. Man hat im Allgemeinen keine Ahnung, wie sehr alle akustischen Erscheinungen von der Temperatur beeinflusst werden. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit — zumal in der Luft — des Schalles hängt wesentlich von ihr ab; noch bedeutender ist ihre Wirkung auf die Tonhöhe. Wenn wir alle die mannigfaltigen und oft ganz entgegengesetzten Aenderungen kennen gelernt haben werden, die die tönenden Körper durch die Wärme erfahren, so wird man erkennen, dass z. B. der Begriff der reinen Stimmung eines Musikinstrumentes in Wirklichkeit auf genau derselben Stufe steht, wie der eines viereckigen Kreises. Beide bedeuten einfach etwas Unmögliches; ersteres aber ganz besonders dann, wenn es sich um die Stimmung einer grösseren Zahl verschiedener Instrumente, um die Stimmung eines Orchesters handelt.

Mögen wir uns ein solches noch so vollkommen rein gestimmt denken, ein einziger Grad Celsius mehr oder weniger genügt, um diesen schönen Wahn gründlich zu zerstören.

Man braucht sich blos zu erinnern, dass die Wärme alle Körper vergrössert. Die Molecule treten auseinander, bedürfen sonach eines erweiterten Raumes. Feste Körper, und vor Allem Metalle, dehnen sich, je nach ihrer Structur, mehr oder minder gleichmässig nach allen Richtungen ihrer Gestalt; die luftförmigen werden verdünnt und dadurch beweglicher.

Die Aenderungen, welche die Wärme in tropfbarflüssigen Körpern hervorruft, können hier übergangen werden, da diese in der musikalischen Akustik soviel wie keine Rolle spielen, oder wenigstens keine solche, dass Temperaturänderungen in Betracht kämen.

Wer Gelegenheit hatte, zu verschiedenen Jahreszeiten längs einer Eisenbahn zu gehen, wird bei Betrachtung der Schienen bemerkt haben, dass sie an den Berührungsstellen im Sommer genau aneinander passen, während sie im Winter ziemlich weit von einander klaffen. Claviere gewöhnlicher Bauart werden im Sommer tiefer, weil

sich die Saiten dehnen, mithin länger werden, und folglich langsamer schwingen. Flügel mit vollständigem Eisenrahmen unterliegen dieser Veränderung aus dem Grunde weniger, weil die Dehnung der Saiten durch die Dehnung des Eisenrahmens, die auf die Saiten spannend wirkt, ausgeglichen wird.

Sind wir nun auch im Stande, bis zu einem gewissen Grade die Einflüsse der äusseren Temperatur dadurch zu paralysiren, dass wir sie möglichst constant erhalten, so gibt es kein Mittel, die moleculären thermischen Veränderungen zu vermeiden, die bei jeder wie immer gearteten Bewegung eintreten müssen.

Eine Stimmgabel, ein Stab, sobald sie schwingen, verändern ihre Lage und rufen dadurch Reibung der Molecularschichten, mithin Erwärmung hervor. Und wie bei festen, so ist dies auch bei luftförmigen Körpern der Fall.

Schon die Tonerregung erzeugt Wärme und ihr Einfluss muss bei Bestimmung der Schallgeschwindigkeit gleich jenem der umgebenden Temperatur in Betracht gezogen werden.

Sie werden also begreifen, mit welcher Vor- und Umsicht vorgegangen werden muss, wenn bei akustischen Bestimmungen — da Luft und feste Körper dabei nicht entbehrt werden können, — angesichts der bedeutenden Temperatureinflüsse, die wir bald kennen lernen werden, möglichst genaue und constant verlässliche Resultate erzielt werden wollen. —

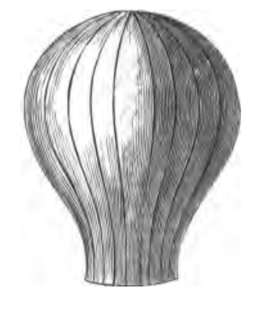
Wenn wir die Thüre einer gewärmten Stube ein wenig öffnen, so dass eine enge Spalte entsteht, und eine brennende Kerze, einmal ganz am Boden, dann wieder in der Höhe zwischen der Spalte halten, so werden wir jedesmal bemerken, dass die Flamme im ersten Falle in das Zimmer herein-, im anderen aber aus dem Zimmer hinausschlägt.

Aus dieser Erscheinung schliessen wir, dass ein Luftzug besteht, der am Boden in das Zimmer, an höherer Stelle aber gegen das Aeussere gerichtet ist. Wenn wir nun weiters mit der Hand oder mit dem Thermometer die Temperatur dieser beiden Luftströme untersuchen, so zeigt sich, dass der untere kälter, der obere wärmer ist.

Nothwendigerweise muss die wärmere Luft auch zugleich die leichtere sein, weil sie sonst nicht auf der kalten ruhen könnte, sondern ebenfalls zu Boden sinken müsste. Da sie aber leichter ist,

so muss sie auch um so dünner sein, je weiter sie sich von der Erde vertical entfernt, eben weil nur dünnere Schichten von dichteren getragen werden können. Daraus folgt, dass die Luft in Höhen dünner sein muss, wie solches auch längst durch Bergfahrer und Luftschiffer erwiesen ist.

Hat aber die durch Erwärmung verdünnte Luft das Bestreben zu steigen, so wird sie, in einen Körper eingeschlossen, dessen Schwere ihre Steigkraft nicht überwiegt, diesen mit sich in die Höhe heben. Auf dieser dynamischen Eigenschaft der erwärmten Luft beruht das Princip der Mongolfiers, von welchen ich Ihnen eine kleine Probe zeigen will (Fig. 84).[1]



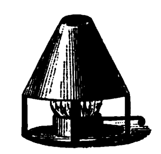
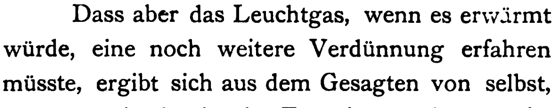
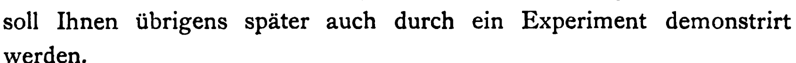


Fig. 84.

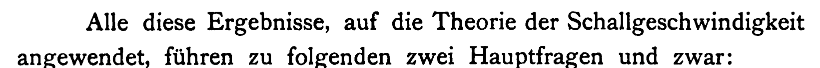
Füllen wir unseren Ballon abermals, jedoch statt mit warmer Luft, mit Leuchtgas, so wird der Ballon ebenfalls in die Höhe steigen, und wir müssen uns folglich sagen, dass Leuchtgas offenbar dünner als gewöhnliche Luft sein müsse, da es selbst nicht erst erwärmt zu werden braucht, um seine Steigkraft zu äussern, ja dass es noch leichter sein muss als verdünnte atmosphärische Luft, weil es auch, wie die Luftfahrten erweisen, die Ballons zu Höhen emporträgt, in welchen die Luft schon sehr dünn ist.



Dass aber das Leuchtgas, wenn es erwärmt würde, eine noch weitere Verdünnung erfahren müsste, ergibt sich aus dem Gesagten von selbst, soll Ihnen übrigens später auch durch ein Experiment demonstrirt werden.



Alle diese Ergebnisse, auf die Theorie der Schallgeschwindigkeit angewendet, führen zu folgenden zwei Hauptfragen und zwar:



1. Verbreitet sich der Schall schneller im dichteren oder im dünneren Mittel? und

2. hat die schnellere Verbreitung auf die Schwingungszahl, mithin auf die Tonhöhe Einfluss?

---

[1]) Ein kleiner Ballon aus Seidenpapier, wie er in den Spielwaarenhandlungen erhältlich ist, wird geöffnet, über ein trichterartiges Blechgefäss gestülpt, unter welchem eine Spiritusflamme. Nach wenigen Augenblicken erhebt sich der Ballon zur Zimmerdecke.

Die zweite Frage ist auf Grund unserer bisherigen Erfahrungen leicht und bestimmt mit Nein zu beantworten.

Wir haben die Fortpflanzung des Schalles durch verschiedene, mehr oder weniger gut leitende Mittel, wie Luft, Wasser, Holz, kennen gelernt, und dabei gefunden, dass in allen Fällen die Tonhöhe unverändert blieb, und haben darauf das Axiom gegründet, dass das Fortpflanzungsmittel, in welchem Zustande es sich befinden möge, an den Abständen der einander folgenden Schallsphären, d. h. an der Tonhöhe nichts ändert.

Wenn die erste Frage sich nicht ebenso einfach beantworten lässt, so liegt der Grund nicht darin, als ob es sich da um complicirtere Vorgänge handeln würde, sondern, weil es den Anschein gewinnen könnte, als geriethen wir mit dem diesbezüglich vorgetragenen Lehrsatze in Widerspruch.

Dieser Lehrsatz lautete dahin, dass der Schall im dichteren Mittel schneller fortschreitet als in dünneren, und die Versuche, die wir diesfalls mit Luft, Wasser und Holz gemacht hatten, haben diesen Lehrsatz bestätigt.

Allein einen Factor hatten wir dabei ausser Betracht gelassen, da wir dessen bisher nicht bedurften: die Elasticität im Verhältnisse zur Dichtigkeit. —

Beginnen wir unsere Untersuchungen bei dem dichtesten unserer drei Experimentalobjecte, beim Holze. An seiner Dichtigkeit vermag weder Wärme noch Kälte namhafte Veränderungen zu bewirken, und ebensowenig lässt sich durch mechanischen Druck eine Dichterstellung der Molecule erzielen. Seine Elasticität kann sonach als ein nahezu constanter Factor angesehen werden.[1]) Dieses gilt mehr oder weniger von allen übrigen festen elastischen Körpern.

Bei weitem anders schon verhält es sich beim Wasser, dessen Dichtigkeit innerhalb enger Grenzen schon erheblich variirt. Bekanntlich erlangt es bei $+ 4^0$ C. seine grösste Dichtigkeit, und nimmt hier den kleinsten Raum ein. Bei zunehmender Wärme dehnt es sich immer mehr aus, bis es, in die Dampfform übergehend, eine Expansion erfährt, der unter Umständen auch die stärksten Gefässe

[1]) Chladny bezeichnet den Widerstand eines Körpers gegen Zusammendrückbarkeit und Dehnung in der Längsrichtung mit Sprödigkeit.

keinen Widerstand zu leisten vermögen. Die mechanische Zusammendrückbarkeit des Wassers ist eine grössere, als die starrer Körper.

Die Zusammendrückbarkeit des Wassers wird jedoch durch jene der Luft weitaus übertroffen, sonach auch die Dehnbarkeit. Besässen Holz und Luft dieselbe Dichtigkeit bei gleicher Elasticität, oder liessen sich Holzmolecule durch Wärme ebenso ausdehnen, beziehungsweise verdünnen, wie die Luft, oder liesse sich Luft so verdichten wie Tannenholz, so würde der Schall durch beide in gleicher Zeit fortgepflanzt werden. Die bessere Leitungsfähigkeit der festen Körper (die wir später näher werden kennen lernen) im Vergleiche mit jener der Luft, beruht eben darin, dass die Elasticität jener im Verhältnisse zu ihren Dichtigkeiten weitaus grösser ist, als dies bei der Luft der Fall.

Nehmen wir vorläufig an, wovon wir uns später durch Experimente überzeugen werden: der Schall durchlaufe Tannenholz 17 mal schneller als die Luft, so wird diese Ziffer aus vorbemerkten Gründen durch noch so bedeutende Temperaturunterschiede keine merkliche Abänderung erleiden, weil Elasticität und Dichtigkeit des Holzes durch Wärme nicht geändert werden.

Dagegen wird die Dichtigkeit der Luft durch Wärme erheblich vermindert, während diese an ihrer Elasticität, die allein vom Drucke abhängt, nichts ändert.

Von diesen Verhältnissen bietet das folgende Schema eine vergleichende Uebersicht:

Holz.

Wärme	Dichtigkeit	Elasticität
0	17	1
1	17	1
2	17	1
3	17	1
4	17	1

Luft.

Wärme	Dichtigkeit	Elasticität
0	1	1
1	1 — x	1
2	1 — 2x	1
3	1 — 3x	1
4	1 — 4x	1

Die wärmere Luft ist aber — wie wir wissen — die dünnere, und so gelangen wir nothwendig zu dem logischen Schlusse, dass dünnere Luft den Schall weiter leitet als dichtere, wir daher bei gleichen Umständen im Sommer den Schall auf grössere Entfernungen hören als im Winter, und ebenso besser in der Richtung von der Tiefe zur Höhe — beispielsweise vom Thale zum Berge — als umgekehrt. —

Jetzt erst sind wir vorbereitet, um an unsere heutige Aufgabe zu gehen, nämlich numerisch die Schnelligkeit zu bestimmen, mit welcher sich der Schall fortpflanzt, und zwar zunächst in der Luft. Das gefundene Resultat wird uns dann als Grundlage dienen, um die Schallgeschwindigkeit in anderen Medien zu finden. Welche Methode immer wir hierbei anwenden, so sind für die Bestimmung entscheidend: die Zeit und die Temperatur. Sonstige Einflüsse, die übrigens an dem Hauptergebnisse wenig ändern, werden später erwähnt werden.

Schon vor nahezu 300 Jahren wurden in dieser Beziehung zuerst von Mersenne[1]) Versuche unternommen, indem er aus dem Echo die Länge des Weges berechnete, den der Schall in einer bestimmten Zeit zurücklegt. Diese, sowie auch spätere Versuche mussten aber ganz unzuverlässliche Resultate liefern, da der Einfluss der Temperatur unberücksichtigt blieb.

Erst in unserem Jahrhunderte wurde der Gegenstand streng wissenschaftlich behandelt. Die ersten eingehenden Versuche wurden von der französischen Akademie unternommen, wobei ausser Temperatur auch Druck und Feuchtigkeit der Luft, sowie Windrichtung mit in Rechnung gezogen wurden. Andere Versuche folgten zu verschiedenen Jahreszeiten unter den verschiedensten Breitegraden und in verschiedenen Höhelagen. Alle ergaben sehr nahe übereinstimmende Resultate. Diese Versuche wurden — von geringen Modificationen abgesehen — in folgender Weise durchgeführt. Man wählte auf eine grössere Entfernung zwei Standplätze, die gegenseitig gut im Auge behalten werden konnten. Auf jedem war eine Kanone aufgestellt, und zu verabredeter Zeit in Zwischenräumen von zehn zu zehn Minuten ein Schuss, und zwar mit wechselnder Ladung (die geraden

[1]) Biographische Notizen über die, in diesen Vorträgen genannten Forscher folgen am Schlusse des Registers.

mit stärkerer, die ungeraden mit schwächerer) abgefeuert. Da das Licht in der Secunde 42.000 geographische Meilen durchlauft, so konnte das Erblicken des Pulverblitzes mit dem Beginne des Schalles als identisch angesehen werden. Der Zeitverfluss zwischen dem Blitze und dem Schalle wurde durch die bei jeder Kanone postirten, mit vollkommen gleichgestellten Secundenuhren und Thermometern versehenen Beobachter angemerkt, und aus einer Reihe solcher Versuche der Durchschnitt gezogen. Endlich wurde die gerade Entfernung beider Standorte genau gemessen und daraus die Geschwindigkeit berechnet. Die Ergebnisse der verschiedenen Beobachtungen nun lassen sich in folgende Sätze zusammenfassen:

1. Der Schall hat in der Luft bei 0° C. eine Geschwindigkeit von rund 330 Metern.[1])

2. Die Geschwindigkeit nimmt bei jedem Wärmegrade um 0·6 Meter zu.

3. Der Wind beschleunigt oder verlangsamt die Geschwindigkeit des Schalles je nach seiner Richtung.

4. Die (hier von dem Masse der Pulverladung abgehangene) Intensität der Erschütterung, beziehungsweise die Amplituden der Schwingungen, sowie die, den Stand des Barometers und des Hygrometers bedingenden Factoren, äussern auf die Geschwindigkeit keinen Einfluss, sondern nur auf die Stärke des Schalles. —

Man hörte die starken Schüsse stärker, die schwachen schwächer, aber stets gleich weit; ebenso hörte man bei hohem Luftdrucke und feuchter Luft den Schall gleich weit, aber schwächer.

---

[1]) Hierüber variiren die Beochtungsresultate. So fanden für 0° C.:

Arago, Gay-Lussac, Humboldt und Prony im Juni 1822 zwischen Villejuif und Monthlery . . . . . 331·05
Moll und van Beck 1823 bei Utrecht . . . . . 332·25
Regnault . . . . . 330·7

Ferner nach Mittheilung von:

Wüllner . . . . . 331·02
Kundt und Pisko . . . . . 332·8
Münch . . . . . 333·—
Hessler . . . . . 331·91
Mahillon . . . . . 327·52
Mahillon bei 20° C. . . . . . 340·—
König bei 15° C. . . . . . 340·—
Biot und Gilbert (ohne Temperaturangabe) . . . . . 332·63

Die runde Zahl von 330 Meter wurde hier lediglich der Einfachheit der Rechnung wegen gewählt.

Endlich wurde durch Versuche anderer Art festgestellt, dass — was übrigens schon die Erfahrung lehrt — hohe und tiefe Töne sich gleich schnell verbreiten, gleichzeitig erklingende Töne also, welches auch die Entfernung sei, gleichzeitig an unser Ohr gelangen, was, wenn es nicht so wäre, allen Rhythmus, alle Harmonie, kurz alle Musik unmöglich machen würde.

Da nun in geschlossenen Räumen Wind, sowie Druck und Gehalt der Luft nicht in Rechnung kommen, so bleibt die Temperatur der einzige Factor, der bei Bestimmung der Schallgeschwindigkeit zu berücksichtigen kommt.

Wir sind jetzt in die Lage gesetzt, verschiedene Bestimmungen auszuführen:

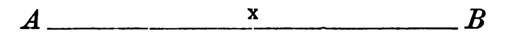
So sind wir z. B. im Stande, aus der Geschwindigkeit des Schalles die Temperatur zu bestimmen. Setzen wir die Standlinie



gleich 1026 Metern, den Zeitverfluss zwischen Blitz und Knall gleich drei Secunden, so brauchen wir nur mit der Zeit in die Länge der Standlinie zu dividiren und finden, dass der Schall in einer Secunde 342 Meter durchlaufen hat. Da er bei 0^0 330 Meter durchlauft, so entfallen die restlichen 12 Meter auf die Wärmezunahme. 12 getheilt durch 0·6 gibt 20^0 C. Wärme. —

Speciell für die Zwecke der Akustik liegt aber die grosse Bedeutung dieser Errungenschaft darin, dass wir durch sie in den Stand gesetzt sind, die Wellenlänge eines jeden Tones bei jeder Temperatur auf das genaueste zu ermitteln. Der Vorgang hierbei ist ein sehr einfacher.

Setzen wir den Fall, an dem einen Ende *A* einer 342 Meter langen Standlinie



sei eine Schallwelle (Verdichtungssphäre) bei 20^0 C. erregt worden, so wird dieselbe nach einer Secunde diesen Raum durchlaufen haben und bei *B* angelangt sein. Wiederholen wir das Exempel, senden wir aber schon nach einer halben Secunde eine neue Welle nach, so wird, da die Wellen, eine wie die andere, gleich schnell

fortschreiten, einander weder voreilen noch zurückbleiben, also ihre ursprüngliche Distanz bis ans Ende beibehalten, die erste Welle in diesem Augenblicke bei x, und wenn die neue Welle bei x ankommt, bei B angelangt sein.

Auf der Strecke AB befinden sich sonach zwei Wellen, deren jede 171 Meter lang ist, und deren Dauer $^1/_2$ Secunde beträgt. Senden wir aber jede $^1/_4$ Secunde der ersten weitere Wellen nach, so werden sich auf der Strecke vier Wellen in Abständen von je $85\,^1/_2$ Metern ausbreiten, oder was dasselbe ist, jede wird eine Länge von $85\,^1/_2$ Meter haben.

Es ist nun leicht, die Wellenlänge eines jeden Tones zu ermitteln, sobald man weiss, wie viel Oscillationen zur Hervorrufung des Tones, dessen Wellenlänge wir suchen, in der Secunde erforderlich sind.

Die Art, wie man die Schwingungszahlen bestimmt, kann heute noch nicht Gegenstand unserer Erörterungen sein. Eine Schwingungszahl jedoch, von der in neuerer Zeit viel die Rede war, dürfte Ihnen bekannt sein: die des sogenannten Normal-*a*. Diese Zahl ist 870 und Sie dürfen überzeugt sein, dass auf die Ermittelung und Feststellung derselben die peinlichste Sorgfalt verwendet wurde, eine Sorgfalt, von der Sie erst dann einen beiläufigen Begriff bekommen können, wenn Sie in die hiebei zur Anwendung kommenden Methoden Einblick erlangt haben werden.

Benützen wir nun diese Schwingungszahl, und versuchen wir die Wellenlänge dieses a^1 zu ermitteln. Wir wollen dieses schöne Experiment[1]) mit einiger Exactheit ausführen.

Wir haben, wie das Thermometer zeigt, im Augenblicke in diesem Lehrsaale eine Temperatur von 20° C.[2]) Wir werden also

[1]) Zur Ausführung desselben sind erforderlich:

1. Eine Glasröhre von 15 Mm. innerem Durchmesser und einer Länge von beiläufig 20 Cm., in welcher ein beweglicher Kolben.
2. Eine Anblasespalte auf einem Gebläse mit gleichmässigem und regulirbarem Winddrucke. (Ein solches Gebläse wird in der Beilage I beschrieben.)
3. Eine Windwage.
4. Eine Normalgabel $a^1 = 870$.
5. Ein schmales Millimetermass von 30 Cm. Länge.

[2]) Falls die Temperatur eine andere ist, müssen die Berechnungen selbstverständlich auf dieselbe basirt werden.

zur Zahl von 330 Metern den Wärmecoëfficienten von 0·6 Meter 20mal hinzu addiren, wodurch wir die Weglänge von 342 Metern bekommen, welche der Schall hier in der Secunde durchläuft. Dividiren wir diese Zahl durch 870, so erhalten wir für unser eingestrichenes *a* eine Wellenlänge von 39·3 Centimeter, d. i. jene Distanz, in welcher die Verdichtungssphären der tönenden Impulse einander folgen. Nachdem nun die Wellenlängen mit den Längen von Luftsäulen, beziehungsweise der sie einschliessenden Röhren in einem bestimmten Verhältnisse stehen, welches Verhältniss nahezu gleich ist der Länge einer beiderseits offenen, oder einer halb so langen, nur einerseits offenen engen Röhre, so brauchen wir bloss eine ganz offene Röhre von 393 Millimeter Länge oder eine halb offene von 196·5 Millimeter Länge ertönen zu lassen, um uns zu überzeugen, dass sie mit der Normalgabel gut übereinstimmen, sobald wir an der Rohrlänge nur noch eine kleine Correction vornehmen, deren Begründung allerdings erst bei der Theorie tönender Luftsäulen erfolgen kann. Diese Correction, welche mit der Länge und Weite der Röhre und dem Winddrucke in einem bestimmten Verhältnisse steht, beträgt für enge halb offene Röhren, bei einer Winddichtigkeit von 100 Millimeter Wasserstand, ungefähr 3·2 Procent der Röhrenlänge, in unserem Falle also 6·3 Millimeter, um die wir die Röhre verkürzen müssen, nämlich von 196·5 auf 190·2 Millimeter, um den mit dem Normal-*a* übereinstimmenden Ton zu erhalten. Wir haben, wie Sie sehen, die Tonhöhe ausschliesslich durch Rechnung gefunden. —

Wollten wir jetzt die Wellenlängen auch anderer Tonhöhen finden, so ist es nicht nöthig, deren Schwingungszahlen erst auf experimentellem Wege zu ermitteln; die Rechnung führt — sobald man die Schwingungszahl auch nur eines Tones kennt — ohneweiters zu diesem Ziele. Man braucht nur das Schwingungsverhältniss des gesuchten Tones zu jenem Tone zu kennen, dessen Schwingungszahl uns bekannt ist. Diese Verhältnisse werden wir später kennen lernen. Wählen wir zu einem Versuche beispielsweise jenes der Oberquinte 3 : 2, mit welchen Zahlen gesagt ist, dass auf je zwei Schwingungen des Grundtones drei Schwingungen der Quinte entfallen. Um also die Wellenlänge des e^2 von unserem a^1 aus zu finden, haben wir blos die Schwingungszahl 870 mit 3 zu multipliciren, das Product durch 2 zu dividiren und durch den Quotienten

1305 (= der Schwingungszahl des e^2) die Schallgeschwindigkeit ebenfalls zu dividiren, endlich von der Hälfte dieses letzteren Quotienten die 3·2procentige Correction in Abzug zu bringen. — Wir erhalten in diesem Falle (bei 20° C.):

$$\frac{342\ \text{M.}}{1305} = 262{\cdot}07 \text{ Millimeter für eine offene, und } \frac{262{\cdot}07}{2} - \frac{131{\cdot}03 \times 3{\cdot}2}{100} \; (= 131{\cdot}03 - 4{\cdot}193) = 126{\cdot}837 \text{ Mm.}$$

für die Länge einer gedeckten Röhre als die Wellenlänge des Tones e^2. — In noch einfacherer Art erzielt man dasselbe nahezu vollkommen übereinstimmende Resultat, wenn man die Wellenlänge des a^1 mit 2 multiplicirt und durch 3 dividirt:

$$\frac{190{\cdot}2 \times 2}{3} = 126{\cdot}8.$$ [1])

Dass man auf diese Weise die Schwingungszahlen und Wellenlängen eines jeden beliebigen Tones finden kann, versteht sich von selbst. — Uebrigens finden Sie in der Beilage II die Schwingungszahlen und Wellenlängen der temperirten Scala auf Grund des Normal-*a*, und einer Schallgeschwindigkeit von 342 Metern, für die Octaven von C_2 bis c^4 ausgerechnet.

Sie werden jetzt auch erkennen, dass ebenso, wie man aus der Schallstrecke die Temperatur ermitteln kann, man ebenfalls die Schwingungszahl eines Tones zu bestimmen vermag, wenn dessen Wellenlänge bekannt ist. —

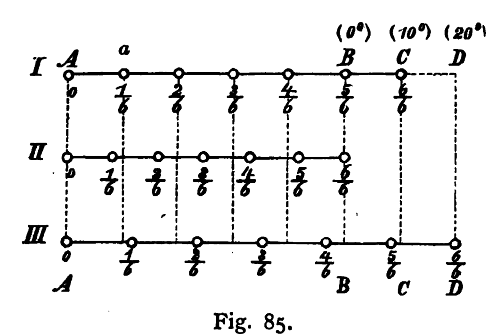


Fig. 85.

Um Ihnen den behandelten Gegenstand möglichst klar zu machen, will ich Ihrer Vorstellung von dem Einflusse der Temperatur auf das Fortschreiten des Schalles noch mit einem graphischen Beispiele zu Hilfe kommen.

Es sei AB (Fig. 85) die Strecke, welche der Schall in einer Secunde bei 0°, AC die Strecke, die er bei 10°, und AD diejenige, die er bei 20° C. durchlauft.

---

[1]) Zu diesem Alternativversuche muss eine engere Röhre benützt werden, weil bei Verwendung der weiteren das e^2 wegen des Mensurverhältnisses (worüber später ausführlich) zu tief wird.

Nehmen wir weiters an, der schallerregende Körper mache sechs Vibrationen in der Secunde und die Temperatur sei 10^0, so werden auf der Strecke *A C* sechs Wellen ausgebreitet sein, so dass die erste, bei *A A* entstandene, nach Verfluss von $^1/_6$ Secunde nach *a* vorgeschritten, beziehungsweise bei *a* angelangt, mithin am Schlusse des sechsten Sechstels der Secunde bei *C* eingetroffen sein, diesen Weg also genau in einer Secunde zurückgelegt haben wird.

Betrachten wir nun aber, wie sich die Sache bei 0^0 verhalten wird, wo der Schall in derselben Zeit nur bis *B* gelangt. Da die sechs Schwingungen in derselben Zeit erfolgen, die erste Welle aber in einer Secunde erst bei *B* eintreffen wird, so ist es klar, dass die Wellen kürzer werden müssen, um auf dieser Strecke in gleichen Abständen Raum zu finden.

Sie werden also in Distanzen wie bei II aufeinander folgen, weil die durch die Kälte erhöhte Dichtigkeit der Luft ihr Fortschreiten hemmt; die Wellen können also nicht in derselben Zeit zu *C* gelangen, wie im früheren Falle, wo das Hinderniss geringer war. Das Gegentheil wird im dritten Falle eintreten, wo die Welle in einer Secunde bei *D* eintreffen soll. Sie wird länger werden, weil sie rascher fortschreiten muss, um in derselben Zeit die längere Strecke *A*—*C* zurückzulegen. Befindet sich also der Beobachter auf der Linie *D*—*D*, so wird der Schall im Falle III genau mit der Secunde, im Falle I aber später, und im Falle II im gleichen Verhältnisse noch später an sein Ohr gelangen. Nimmt er dagegen die Standlinie *B*—*B* ein, so ergibt sich der umgekehrte Fall und der Beobachter wird I früher und III im gleichen Verhältnisse noch früher vernehmen; nimmt er endlich die Linie *C*—*C* ein, so wird er III früher und II später hören.

Es ergibt sich daraus, dass die Wellenlänge eines Tones in der Luft von der Temperatur abhängt, ohne dass die Schwingungszahl sich ändert. Man hört den Ton in derselben Zeit und auf dieselbe Entfernung nur früher oder später, man vernimmt ihn nur mehr oder weniger weit, aber weder tiefer noch höher.

Die Fortsetzung der Betrachtungen über unseren Gegenstand wird uns im nächsten Vortrage beschäftigen.

---

11. Vortrag.

(Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit.)

Wir haben mittelst unserer in den bisherigen Vorträgen gepflogenen theoretischen Untersuchungen und der daraufhin unternommenen Versuche über die Schallgeschwindigkeit gefunden:

1. dass der Schall in festen Körpern um so rascher fortschreitet, je dichter, beziehungsweise spröder diese sind, und umgekehrt: dass er in luftförmigen um so schneller fortkommt, je dünner, beziehungsweise leichter sie sind; 2. dass die Schwingungszahlen eines, durch welches Mittel immer fortgepflanzten Tones mit der Zu- oder Abnahme der Temperatur eine Aenderung nicht erleiden.

Was den ersten Punkt anbelangt, so haben wir in Betreff der luftförmigen Körper die Beweise vorerst nur für die mehr oder minder erwärmte atmosphärische Luft und für ein Gas, das Leuchtgas, erbracht, welches unter gleichen Verhältnissen leichter ist, als die Luft.

Wenn wir nun — gleichsam als Gegenprobe — den Versuch machen, den Schall durch ein Gas zu leiten, welches schwerer ist als die atmosphärische Luft, so wird der Schall in demselben offenbar langsamer fortkommen. Er wird in seinem Fortschreiten aufgehalten werden, seine Wellen, d. h. die Abstände seiner Verdichtungssphären, werden daher verkürzt. Je länger die Strecke ist, welche der Schall in dem dichteren Mittel zurückzulegen hat, um so grösser wird die Verlangsamung werden.

Der Versuch, den wir alsbald anstellen wollen, wird uns aber zugleich eine weitere Analogie zwischen Schall und Licht erkennen lassen, indem ersterer gleich letzterem beim Durchgange durch ein dichteres Mittel, wenn dessen Begrenzung nicht parallele Ebenen bilden, eine Ablenkung der einfallenden Strahlen von der Geraden erleidet, derzufolge die Strahlen, wenn die Flächen nach Innen gekrümmte, sogenannte concave sind, sich an einer Stelle, die man Brennpunkt nennt, vor dem Durchgangsmittel sammeln, wenn aber die Begrenzung eine nach aussen gekrümmte, sogenannte convexe ist, sich in einem Brennpunkte hinter dem Durchgangspunkte vereinigen.

Man nennt in der Optik lichtdurchlässige Körper ersterer Form Zerstreuungs-, letzterer Form aber Sammellinsen. Die Wirkung einer, die Strahlen vor sich concentrirenden, also nach innen gekrümmten Ebene werden Sie das nächstemal kennen lernen, wo die Reflexion (Zurückwerfung) des Schalles unser Thema bilden wird.

Jetzt wollen wir den Versuch mit, durch ein dichteres luftförmiges Mittel, als es die atmosphärische Luft ist, durchgehenden Schallstrahlen vornehmen.

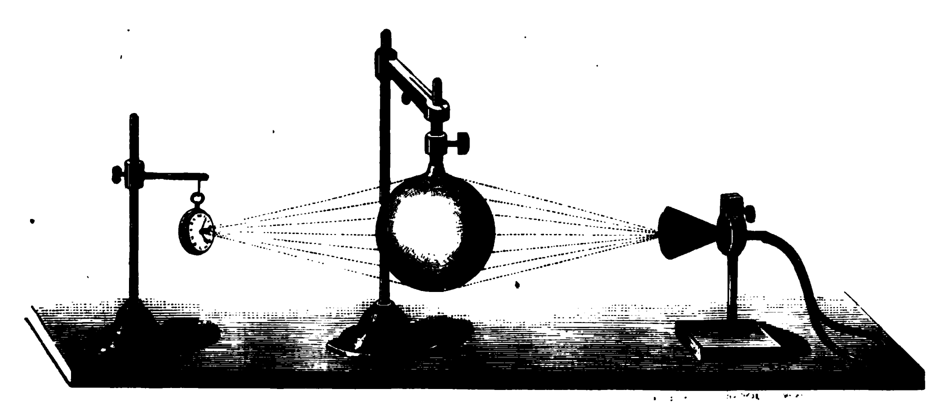


Fig. 86.

In diesem Gummiballon (Fig. 86) befindet sich kohlensaures Gas, dessen Dichtigkeit zu jener der atmosphärischen Luft sich verhält wie 1·529 zu 1, und dessen Schallleitungsvermögen sich wie 79 zu 100 oder rund wie 4 zu 5 verhält, womit gesagt ist, dass, wenn der Schall in der Luft während einer bestimmten Zeit (x) 5 Fuss durchschritten hat, er im Gase erst 4 Fuss vorwärts gekommen, also um 1 Fuss zurückgeblieben ist. Er wird demnach in jedem darauf folgenden gleichen Zeitintervalle um 1 Fuss weiter zurückbleiben, also in der Zeit

x wie 4 : 5,
$2x$ » 8 : 10,
$3x$ » 12 : 15,
$4x$ » 16 : 20,

u. s. w., d. i. im ersten Intervall um 1, im zweiten um 2, im dritten um 3, im vierten um 4 Fuss.

Hinter dem Ballon nun stellen wir in seiner Axenrichtung eine Taschenuhr, vor demselben in einer erst zu ermittelnden Entfernung gleicher Richtung etwa einen Trichter auf, der uns als Hörrohr dienen soll. Befindet sich letzterer in richtiger Distanz, nämlich im Schallfocus, so werden wir, am Ende des Trichters horchend, das Ticken der Uhr fast ebenso deutlich vernehmen, als hielten wir sie an das Ohr. Der Schall verschwindet aber sofort, wenn wir unsere Distanz oder jene des Ballons ändern.

Wodurch nun wird die Ablenkung der Schallstrahlen von der Geraden bei ihrem Austritte aus dem Ballon und ihr Zusammenlaufen in einem Punkte bewirkt? Diese Convergenz ist die Folge der Verlangsamung, welche die Schallstrahlen bei ihrem Durchgange durch das dichtere Medium des kohlensauren Gases erfahren.

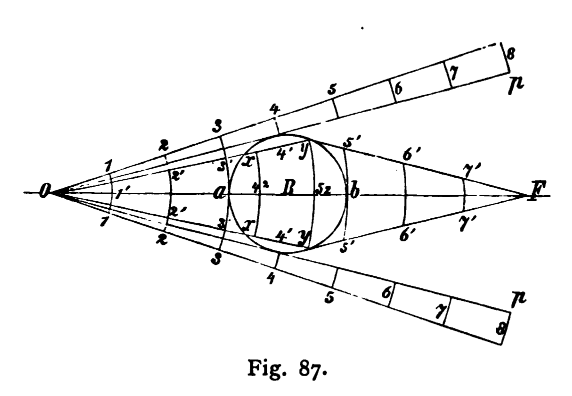


Fig. 87.

Die Zeichnung (Fig. 87) wird uns den Vorgang versinnlichen. Eine von O ausgehende Schallsphäre gelangt nach bestimmten, gleichen, hier mit fortlaufenden Zahlen bezeichneten Zeitabständen beim Ballon B und zwar bei a an. Nun sind, der Configuration des Ballons gemäss, die Schichten des von ihm umschlossenen Gases ungleich lang. In den, der Axe des grössten Kreises ab zunächst liegenden Gasschichten haben die Strahlen den längsten Weg zu durchlaufen, sie erfahren also hier ihre grösste Verlangsamung, wogegen die näher der Peripherie, beispielsweise bei x, eintretenden einen kürzeren Weg durch das Gas nehmen. Ueberdies können sie von 3 bis x noch umgehemmt fortschreiten, während die axialen Strahlen der bei 3 angelangten Sphäre bereits bei a in das dichtere Medium eintreten, und also hier schon ihre Verlangsamung zu erleiden beginnen.

Wenn nun auch die seitlich in den Ballon eintretenden Strahlen in ihrem Fortschreiten durch das Gas ebenfalls aufgehalten werden, wie dies durch die Unterschiede der Abstände zwischen den am

Ballon vorüber ungehindert fortschreitenden Sphären *op* und den bei *y* austretenden angedeutet ist, so kommen sie dennoch viel schneller vorwärts als die axialen. Während aber die bei *y* austretenden Strahlen, die sich von hier ab wieder in dem dünneren Mittel bewegen, also in ihren ursprünglichen Abständen (gegen die sie nur um ein Geringes gleichmässig zurückblieben) fortschreiten können, haben die gleichzeitig axial eingefallenen Strahlen den Ballon, wie in dem Falle 5, 5_1, 5_2, noch gar nicht verlassen. Es entsteht also um die Axenlinie herum vor dem Ballon ein unverdichteter Raum, in welchen die verdichteten Luftmolecule nothwendig eintreten, und dadurch eine convergirende Richtung bekommen, die sie schliesslich in dem Focus *F* zusammenführt.

Wäre die Kohlensäure so dünn wie die Luft, so würden die Schallstrahlen den Ballon ebenso schnell wie die freie Luft durchlaufen; es käme zu keiner Convergenz, zu keiner Bildung eines Brennpunktes, sondern vielmehr zu jener eines schwächenden Schallschattens.

Hier der Beweis, sobald wir den Gasballon mit einem mit atmosphärischer Luft gefüllten vertauschen.[1]) —

Die andere Erfahrung, die wir aus den Versuchen über den Einfluss der Temperatur auf die Schallfortpflanzung gewonnen haben, hat uns belehrt, dass die Schwingungszahl eines, durch welches Mittel immer fortgeleiteten Klanges, d. i. seine Tonhöhe, durch Temperaturunterschiede keine Aenderung erleidet.

Wie nun aber verhalten sich die verschiedenen Schallquellen selbst zur Temperatur? Hat die Zu- oder Abnahme der Wärme auf die Schwingungszahl der tönenden Körper einen Einfluss und welchen?

Um den Vordersatz dieser für die Akustik so überaus wichtigen Frage ohneweiters im bejahenden Sinne zu beantworten, bedarf es nicht erst der Experimente (die Ihnen übrigens nicht vorenthalten werden sollen); die einfache Ueberlegung führt uns dahin.

Wir haben erfahren, dass der Ton einer Stimmgabel tiefer wird, wenn wir ihre Zinke mit einem Gewichte beschweren. Wir haben dadurch ihr Eigengewicht vermehrt und sie somit gezwungen, langsamer zu schwingen.

---

[1]) Wird demonstrirt.

Nehmen wir einen geraden, an einem Ende befestigten Stab (Fig. 88) und lassen wir ihn in einer Länge oscilliren, die seine Schwingungen zu zählen gestattet, so werden wir finden, dass die Schwingungen langsamer vor sich gehen, wenn wir den Stab mit einem Gewichte beschweren; wir werden aber dasselbe Resultat durch blosse Verlängerung des Stabes erreichen. Wir stehen wieder vor dem Pendelgesetze: verlängern wir das Pendel, und es wird langsamer schwingen.

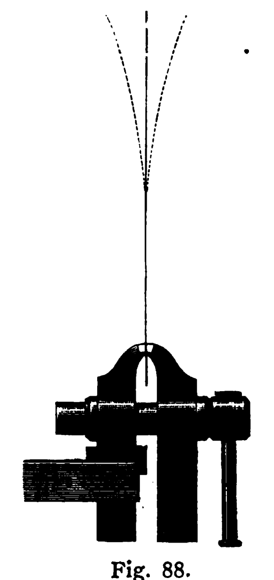


Fig. 88.

Die Stimmgabel ist aber nichts Anderes als ein in seiner Mitte gebogener Stab. Verlängern wir die Zinken, so wird sich der Ton vertiefen. Sie schwingen also offenbar langsamer. Dieser Versuch belehrt uns sonach, dass Verlängerung der Beschwerung der Zinken substituirt werden kann, da beide dieselbe Wirkung haben: die Schwingungszahl herabzusetzen.

Wir können uns hievon sofort überzeugen, indem wir von diesen beiden gleichgestimmten und deshalb ohne Schwebungen erklingenden Stimmgabeln, die eine einen Augenblick lang der Gasflamme aussetzen. Beider Zusammenklang wird jetzt Schwebungen hören lassen, denn die Schwingungszahlen sind verschiedene geworden, indem die erwärmte Gabel langsamer schwingt, ihr Ton also tiefer geworden ist, was ein geübtes musikalisches Ohr auch beim einzelnen Vergleiche beider Tonhöhen leicht wahrnimmt.

Da die Metalle durch die Wärme ausgedehnt werden, so müssten sich auch die Zinken der erwärmten Gabel verlängern, demnach langsamer schwingen und folglich einen tieferen Ton hervorbringen. Bei der Saite haben wir dieselbe Erfahrung gemacht. Die Tonhöhe metallischer Körper steht also mit der Temperatur in einem umgekehrten Verhältnisse. Mit steigender Wärme sinkt der Ton.

Aus diesem Grunde genügt es denn auch nicht, zu sagen: »Diese Stimmgabel macht in der Secunde x Schwingungen«, sondern man muss auch noch hinzufügen, bei welchem Temperatursgrade sie dieses x vollführt.

Wie nun verhält es sich in dieser Hinsicht bei Schallquellen, deren Princip auf der durch Luft in tönende Schwingungen versetzten Luftsäule beruht, und wohin wir alle Blasinstrumente, und insbesondere die Orgelpfeifen, zu zählen haben? Hier lehrt uns die Erfahrung, dass das Gegentheil der Erscheinungen erfolgt, die sich bei festen Körpern ergaben. Statt vertiefend, wirkt die Wärme hier erhöhend auf den Ton. Da aber Wärme die luftförmigen Körper durch deren Ausdehnung verdünnt, so wird der Satz zu lauten haben:

Der Eigenton luftförmiger tönender Körper ist höher, je dünner das Medium; es müssen also in dünnerer Luft die Schwingungen rascher einander folgen.

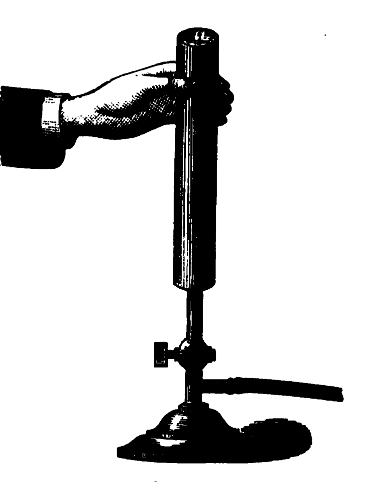


Fig. 89.

Den Beweis werden uns folgende Versuche liefern. Diese an einem Ende verschlossene Papprōhre (Fig. 89), oder vielmehr die von ihr umschlossene Luftsäule gibt, wenn wir auf die Verschlussplatte *a* klopfen, einen Ton von bestimmter Höhe. Ersetzen wir die atmosphärische Luft in der Röhre durch das dünnere Leuchtgas, so wird der Ton sofort höher werden[1]), das leichtere Gas, da es nach oben nicht entweichen kann, verdrängt die schwerere Luft und nimmt nun ihren Raum ein. Kehren wir die Röhre um, so entweicht das Gas, die atmosphärische Luft kann wieder eintreten und die Tonhöhe sinkt auf ihr ursprüngliches Niveau.

Derselbe Effect wird erfolgen, wenn wir in eine hartgelöthete Messingpfeife, welche, mit dem Munde oder dem Orgelwinde angeblasen, das a^2 hören lässt, Leuchtgas eintreten lassen. Der Ton steigt um mehr als eine grosse Terz, eine Erscheinung, auf die wir bei Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in verschiedenen Medien zurückkommen werden. Nun erinnern wir uns aber, dass erwärmte Luft dünner wird. Der Ton unserer Pfeife wird

[1]) In unserem Falle um eine übermässige Quarte, da die Röhre in der Länge 40 und im Durchmesser 5 Centimeter misst und den Ton as^0 gibt.

also offenbar noch weiter an Höhe zunehmen, wenn wir das Leuchtgas erwärmen. Diese Verdünnung bewirken wir einfach durch Entzündung des Gases am Labium und steigern sie, wenn wir es auch am oberen Ende der Pfeife entzünden (Fig. 90).

Da nun aber die Verdünnung der atmosphärischen Luft — und diese kommt in der Regel bei solchen Schallquellen ausschliesslich in Anwendung — nur durch Erwärmung bewirkt wird, so wird die Tonhöhe aller auf der tönenden Luftsäule fussenden Instrumente mit der Temperatur in einem geraden Verhältnisse stehen, d. h. die Töne werden um so höher, je höher die Temperatur steigt.[1])

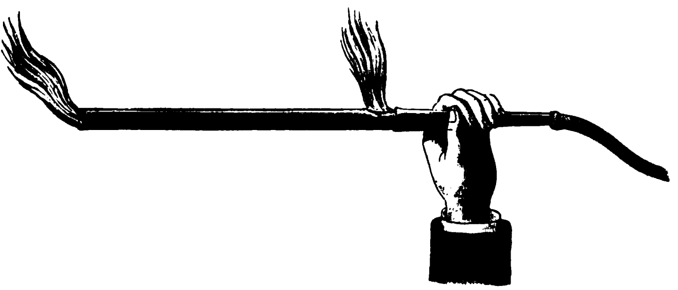


Fig. 90.

In welchem Masse durch Temperaturunterschiede die Schwingungszahlen beeinflusst werden, und wie nothwendig es ist, dieses Mass für jeden Körper, für jeden Wärmegrad, wie für jede Tonhöhe zu kennen, wird uns erst klar werden, wenn wir uns mit der Bestimmung der Schwingungszahlen überhaupt befassen werden. Hier sei diesfalls nur nebenbei bemerkt, dass ohne Kenntniss des numerischen Werthes dieses Einflusses es beispielsweise ganz unmöglich wäre, eine Orgel so einzustimmen, dass sie bei einer bestimmten Temperatur genau der Normalstimmung entspricht, wenn diese Temperatur während des Stimmens nicht vorhanden ist.

[1]) Offenbar wird demnach eine mit dem Munde angeblasene Pfeife tiefer klingen, als wenn sie bei gleichem Winddrucke und einer der Wärme des Athems gleichen Temperatur mittelst eines Gebläses zum Tönen gebracht wird, weil die ausgeathmete Luft in Folge ihres Kohlensäuregehaltes schwerer, also dichter ist, als die gleich warme und mit gleichem Drucke wirkende atmosphärische Luft. — Vergleichende Versuche hierüber sind meines Wissens noch nicht angestellt worden.

Ein Blick in die, diesem Zwecke dienende, in der Beilage III enthaltene Tabelle, die nur für einen einzigen Temperatursgrad (20° C.) berechnet ist[1]), wird Sie erkennen lassen, dass das Einstimmen einer einzigen Pfeife unter solchen Bedingungen keine so einfache Sache ist.

Die Frage, welches der Vorgang in einer Pfeife ist, dass ihre Luftsäule, je wärmer oder dünner, um so höher, je kälter oder dichter sie ist, um so tiefer tönt, beziehungsweise wodurch die Beschleunigung oder Verlangsamung ihrer Schwingungen bedingt wird, ist leichter zu erklären, als hier schon zu begründen. Letzteres kann erst geschehen, wenn wir zur Theorie von den Schwingungen der Luft in Röhren gelangen.

Die Erklärung jedoch wird uns ein Versuch alsbald zur Hand geben.

Ueberzeugen wir uns durch Anblasen einer mit einem Stimmringe versehenen offenen Zinnpfeife[2]) und das Anschlagen einer Gabel, dass sich beide genau im Einklange befinden. Diese Ueberzeugung gewinnen wir durch die Wahrnehmung, dass beide Töne ruhig, ohne periodischen Wechsel ihrer Stärke ineinander fliessen und gleichsam einen Ton bilden. Denn, wenn dieser vollkommene Einklang nicht erreicht ist oder gestört wird, so macht sich ein abwechselndes An- und Abschwellen der Tonstärke bemerklich, welches um so schneller aufeinander folgt, je weiter sich beide Töne vom Einklange entfernen. Von der näheren Erklärung dieser Erscheinung müssen wir hier absehen. — Constatiren wir ausserdem noch den Temperatursgrad, welchen die Luft gegenwärtig in dem Rohre der Pfeife zeigt, indem wir das Thermometer eine Weile in das Rohr frei hängen (Fig. 91) und dann ablesen. Halten wir nun unsere klingende Gabel vor die sogenannte Anblasemündung der nicht selbsttönenden Pfeife, so wird der Gabelton durch das Mittönen der gleich gestimmten Luftsäule verstärkt werden. Die Pfeife fungirt jetzt als genau gestimmter Resonator. Jetzt erwärmen wir aber die Pfeife und damit ihren Luftkörper[3])

Fig. 91.

[1]) Für jeden anderen Temperatursgrad muss die Tabelle von neuem berechnet werden.

[2]) Die Pfeife muss, um die Tonhöhe constant zu erhalten, selbstverständlich mittelst eines nicht variablen Gebläses zum Tönen gebracht werden.

[3]) Man bewirkt dies am einfachsten, wenn man die Pfeife mit blossen Händen eine Weile umfasst.

und constatiren in gleicher Weise, wie zuvor, mittelst des Thermometers (Fig. 92), dass die Luft in der Pfeife und zwar um 2^0 gestiegen ist. Halten wir abermals die Gabel vor die Mündung, so finden wir, dass die Tonhöhe zwar dieselbe geblieben, aber die Stärke der Resonanz abgenommen hat, was darauf schliessen lässt, dass der Eigenton der Luftsäule mit jenem der Gabel nicht mehr so vollständig wie früher im Einklange steht.

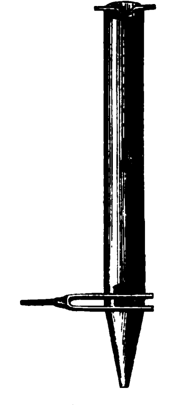
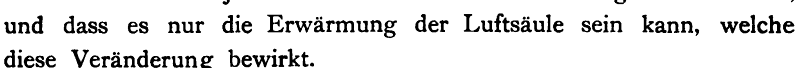


Fig. 92.

Aus dem genauen Resonator ist ein nur annähernd gleich gestimmter geworden.

(Nebenbei bemerkt, erfährt durch diesen Beweis das Gesetz, dass ein Resonator, wenn er nicht als Selbsttöner fungirt, immer nur den empfangenen Ton unverändert wiedergibt, seine neuerliche Bestätigung.)

Lassen wir nun die Pfeife wieder durch sich selbst ertönen und machen die Gabel klingen, so hören wir An- und Abschwellungen des Tones und schliessen daraus, dass der Einklang zwischen Pfeife und Gabel nicht mehr vorhanden ist, und zwar, dass die Pfeife es sein müsse, die ihre Tonhöhe geändert hat, weil wir ja an der Gabel keine Veränderungen vornahmen,



und dass es nur die Erwärmung der Luftsäule sein kann, welche diese Veränderung bewirkt.

Dass aber diese Veränderung auf einer *Erhöhung* des Pfeifentones beruht, wird der folgende Versuch darthun, der somit den Beweis erbringt, dass wärmere oder, was dasselbe ist, leichtere Luft, *wenn sie selbsttönender Körper* ist, schnellere Schwingungen macht.

Wir werden die Pfeife abermals mit der Gabel in Einklang bringen, indem wir die Länge des Rohres mittelst des verschiebbaren Ringes reguliren, mit welchem, wenn wir ihn höher schieben, wir das Rohr verlängern, oder es, wenn wir ihn herabschieben, verkürzen und im ersteren Falle, wie unser Ohr uns belehrt, den Ton vertiefen, im zweiten erhöhen.

Wir haben jetzt den Einklang erreicht und *erwärmen das Rohr abermals*. Es stellen sich, wenn wir jetzt Gabel oder, damit wir die Beobachtung länger anstellen können, eine mit ihr gleich gestimmte Zunge oder zweite Pfeife mit unserer Pfeife zugleich er-

klingen machen, die bekannten Schwebungen ein, die jedoch sofort verschwinden, wenn wir den Ring höher schieben und dadurch den Ton der Pfeife vertiefen, woraus denn unzweifelhaft hervorgeht, dass der Ton der Pfeife durch die Erwärmung erhöht wurde.

Sie werden jetzt die Frage aufwerfen, ob denn die Erwärmung der Pfeife nicht auch eine entgegengesetzte, und demnach wenigstens zum Theil paralysirende Wirkung ausübe, indem ja das Pfeifenrohr, da es aus Metall besteht, durch die Wärme eine Verlängerung erfährt, ihr Ton sonach tiefer werden müsse. Dem ist in der That so. Allein dieser Factor stellt sich gegenüber dem Einflusse der Erwärmung der Luft als ein nahezu verschwindender heraus, denn, während die Tonhöhe, beispielsweise einer bei $16^2/_3{}^0$ C. das eingestrichene *a* (= 870 einfachen Schwingungen) angebenden offenen Zinnpfeife von 391 Millimeter Länge, mit jedem Centigrad Wärme um 1·6 einfache Schwingungen zunimmt, mithin bei einer weiteren Temperaturzunahme von $32·4^0$ um 51·8 einfache Schwingungen, d. i. um einen halben Ton steigt, dehnt sich unsere Pfeife bei jedem Grade Wärmezunahme blos um $^1/_{46000}$ ihrer Länge. Sie verlängert sich demnach, bei einer Wärmezunahme von $32·4^0$, von 391 auf 391·275 Mm., wodurch sich die Schwingungszahl von 870 auf 869·388 vermindert [1]), woraus sich ergibt, dass dieser Factor, wie schon bemerkt, vollständig ausser Betracht bleiben kann.

Wie geringfügig dieser Factor ist, geht auch aus dem Umstande hervor, dass Labialpfeifen aus Holz wie aus Metall, gleichviel welcher Gattung, mit zunehmender oder abnehmender Wärme gleichmässig höher oder tiefer werden, wiewohl das Holz in seiner Längsrichtung durch Temperatureinflüsse eine Veränderung nicht erfährt.

Fassen wir alles über den Einfluss der Beschaffenheit der Medien auf das Leitungsvermögen schallfortpflanzender, wie auf die Schwingungszahl schallerregender Körper bisher Durchgenommene in Hauptsätze zusammen, so lauten die Ergebnisse, wie folgt:

1. Der Schall durchlauft in derselben Zeit eine längere Strecke in dem minder dichten Medium bei zunehmender Elasticität, beziehungsweise Sprödigkeit des letzteren.

---

[1]) Hier die Ausrechnung: $\frac{391}{46000} \times 32·4 = 0·275$ Mm. — Da die Schwingungszahlen von Luftsäulen sich im Allgemeinen umgekehrt wie ihre Längen verhalten, so folgt: $x : 870 = 391 : 391·275$, daher $x = 869·388$.

2. Die Beschaffenheit des Mediums hat auf die Zeitfolge der fortschreitenden Schallsphären, mithin auf die Tonhöhe keinen Einfluss, gleichviel ob die Töne hoch oder tief, stark oder schwach sind.

3. Das dünnere, luftförmige Medium, wenn es selbsttönend ist, verkürzt die von ihm ausgehenden stehenden Wellen vermöge der rascheren Aufeinanderfolge seiner Schwingungen.

4. Die Wärme ist von wesentlichem Einflusse auf die Schwingungszahl und wirkt auf die metallischen Körper verzögernd, auf die luftförmigen beschleunigend.

12. Vortrag.

(Reflexion des Schalles. — Elektro-Magnetismus.)

Bevor wir in unseren Untersuchungen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, sowohl in der Luft wie in anderen Medien, fortfahren, müssen wir vorerst noch die Erscheinungen in Betracht ziehen, die von der Zurückwerfung (Reflexion) des Schalles herrühren.

Bekanntlich wird der Schall, wenn er bei einem Medium anlangt, welches dichter ist als dasjenige, durch welches er bis dahin gegangen, zurückgeworfen und zwar, je grösser der Dichtigkeitsunterschied, mit um so grösserer Energie und geringerem Kraftverlust. Dass freie, elastische, in geradliniger Bewegung befindliche Körper im sogenannten Einfallswinkel reflectiren, d. h. in der gleichen Richtung, in der sie an eine ihnen entgegenstehende Ebene anprallen, auf die entgegengesetzte Seite zurückgeworfen werden, das weiss Jedermann aus vielfältiger eigener Erfahrung.

Hier bieten die Lichterscheinungen die nächste Analogie. Um z. B. einen Gegenstand, der zwei Schritte rechts von einem Spiegel sich befindet, inmitten des Spiegels zu erblicken, müssen wir uns ebenso weit links vom Spiegel aufstellen.

Dass sich die aufsteigende oder sinkende Sonne in Fensterscheiben spiegelt, rührt ebenfalls daher, dass die Strahlen im Einfallswinkel reflectirt werden. Aus diesem Grunde tritt die Spiegelung bei

höheren Gegenständen morgens später und abends früher ein (Fig. 93). Es wird also das Fenster 1 von der aufgehenden Sonne *a* früher für das Auge beleuchtet erscheinen, als das Fenster 2; dagegen wird die sinkende Sonne (a_1) sich früher in 2 und später in 1 spiegeln. Billardspieler wissen, dass der Ball, den sie an eine Bande anspielen, in entgegengesetzter Richtung zurückläuft, wodurch sie es ermöglichen, einen Ball von rückwärts zu treffen, der in gerader Richtung durch andere Bälle, oder durch Kegeln verstellt (maskirt) ist.

Fig. 93.

Wirft man einen Gummiball schräg zum Fussboden, so wird er in entgegengesetzter Richtung zurückprallen. In allen Fällen erfolgt aber die Reflexion in dem gleichen Winkel zur Ebene, wie der Anfall.

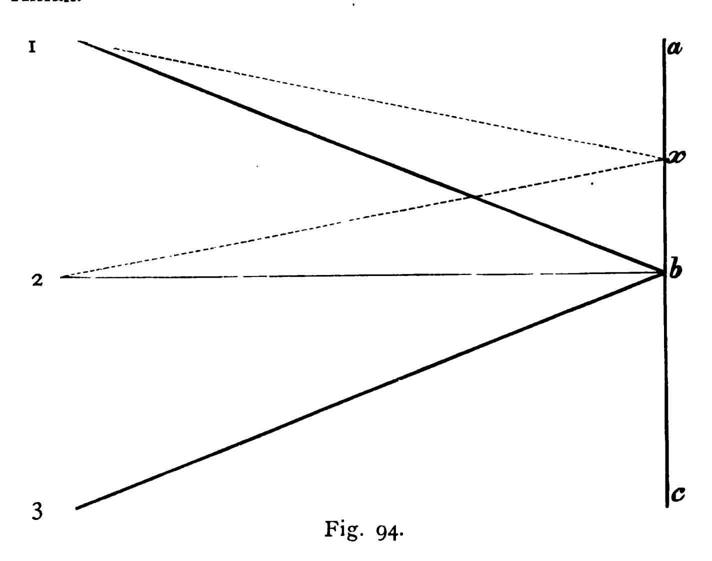


Fig. 94.

Dass dieses auch beim Schalle stattfindet, lässt sich durch ein einfaches Experiment nachweisen.

Geben wir einer Röhre (Fig. 94) die Richtung gegen eine Wand oder Tafel *a c* in dem Winkel 1 *b*, so wird die Linie *b* 3 den

Reflexionswinkel bilden. Wird durch die Röhre in dieser seiner Stellung ein Klang geleitet, so wird Jemand, der den Standplatz 3 einnimmt, den Ton zufolge der Reflexion gut hören, nicht aber, wenn er sich auf der Linie 1 oder 2 befindet, oder wenn die Mündung der Röhre auf *a* oder *c* gerichtet wird. Auf der Linie 2 wird er nur dann gut hören, wenn die Röhre entweder in dem Winkel *x* 1 oder genau senkrecht auf die Ebene oder Tafel, d. i. 2 *b* gerichtet wird.

Trifft also ein Schallstrahl senkrecht auf die Ebene, so wird er auch genau in dieser Richtung zurückgeworfen. — Dass man den Klang auch an anderen Punkten, wiewohl schwächer, hört, rührt daher, dass der Klang — wie Ihnen bekannt — sobald er die Röhre verlässt, sich kugelförmig nach allen Richtungen verbreitet.

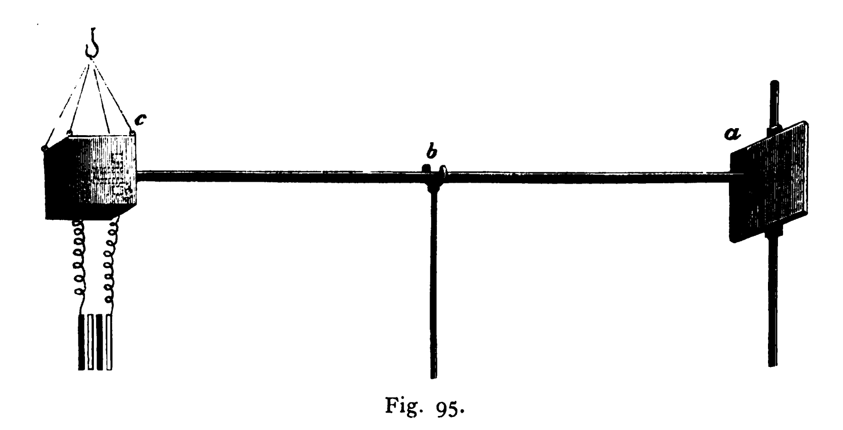


Fig. 95.

Wir wollen uns von dem soeben Vorgetragenen durch einige Versuche überzeugen.[1])

Die Erklärung aller auf diesem Reflexionsgesetze fussenden Erscheinungen wäre nun eine sehr einfache, wenn nur überall die

[1]) Der hiezu dienende Apparat besteht in einer längeren, wagrecht in der Ohrhöhe gegen eine senkrecht drehbare Tafel (*a*) (Fig. 95) gerichteten Metallröhre (*b*), die am anderen Ende mit einem weich ausgefütterten, an Schnüren hängenden Kästchen (*c*) verbunden ist, in welchem eine elektrisch tönende Stimmgabel dicht eingeschlossen sich befindet. Durch Drehung der Tafel kann man dem aus der Röhre kommenden Schall den beliebigen Reflexionswinkel geben. Kann die Röhre durch die Wand in ein Nebengemach geführt werden, so entfallen Kästchen und Gabel, und lässt sich eine andere beliebige Schallquelle benützen.

Bedingungen so einfach lägen, wie die Theorie sie verlangt. Die Schwierigkeit liegt grösstentheils in der Verschiedenheit der Reflexionsflächen, besonders dann, wenn wir es mit mehreren derselben in einem und demselben Falle zu thun haben. Zu den schwierigsten Problemen dieser Art gehört das Rollen des Donners; denn selbst im einfachsten Falle, dass das Gewitter in einer Ebene stattfindet, wo das Echo der Berge ausser Spiel bleibt, lässt sich bei der wandernden Natur dieses Phänomens schwer entscheiden, was der Erschütterung der Atmosphäre durch den Blitzstrahl selbst zuzuschreiben und was auf Rechnung der Rückwerfung dieser Erschütterung durch die verschiedenen Wolkenschichten, sowie der Reflexion zwischen diesen und der Erde zu setzen ist. Nimmt der Blitz die Richtung auf uns zu, so hören wir die durch ihn bewirkte Erschütterung der Luft als einen von Geknatter begleiteten Knall, weil die entfernteren Wellen mit den zuletzt in unserer Nähe erweckten, bei der Schnelligkeit des Blitzes, fast gleichzeitig ankommen.

Im umgekehrten Falle hören wir die Erschütterungen, da sie den Weg von uns weg nehmen, als Rollen.

Deshalb und weil wir auch die Höhe der Wolkenschichte im Momente der elektrischen Entladung nicht kennen, ist es nicht leicht, die Entfernung eines Gewitters genau zu berechnen. Aber es lässt sich berechnen und wie dies geschieht, wollen wir an der einfachsten und bekanntesten Reflexionserscheinung, dem Echo, zeigen.

Da, wie wir bereits wissen, die Reflexion vom dichteren Medium an der Zeitfolge der Schallsphären nichts ändert, sondern nur deren Intensität schwächt, so wird ein reflectirter Schall seinen Rückweg mit unveränderter Schwingungszahl antreten und zurücklegen und, falls er nochmals oder öfters zur Wiederholung desselben Hin- und Herganges gezwungen wurde, denselben ebenfalls mit genau derselben Schwingungszahl vollführen, so lange von ihm — nämlich vom Schalle — noch etwas vorhanden ist.

Wir wissen, dass der Schall bei 20^0 C. 342 Meter in der Secunde durchlauft. Wenn wir also bei dieser Temperatur ein Echo beobachten, das einen Ton, einen Knall, eine Silbe nach genau einer Secunde wieder hören lässt, so wissen wir:

1. dass sich uns gegenüber, senkrecht zur Achse unserer Standlinie, eine reflectirende Ebene befindet, und

2. dass diese Ebene genau 171 Meter von uns entfernt sein muss, weil der Schall für den Hin- und Rückweg 342 Meter in der Secunde braucht.

Daraus, wie aus dem Reflexionsgesetze, lassen sich nun alle Arten des Echo leicht berechnen.

Beträgt z. B. unsere Standlinie bis zur reflectirenden Ebene die Hälfte der obigen Entfernung, nämlich $85\,^1/_2$ Meter, so wird uns das Echo schon nach einer halben Secunde antworten.

Da man im Durchschnitte deutlich nur fünf Silben in einer Secunde aussprechen kann, die Dauer der Silbe sonach $^1/_5$ oder $^2/_{10}$ Secunden beträgt, so wird zu einem sogenannten einsilbigen Echo die Entfernung von 34·2 Metern erfordert, damit der Schall in $^2/_{10}$ Secunden seinen Weg hin und her machen kann.

Es ist sonach selbstverständlich, dass ein sogenanntes zweisilbiges Echo eine grössere Distanz oder ein schnelleres Aussprechen der Silben erfordert.

Die sogenannten mehrfachen Echos entstehen dann, wenn mehrere reflectirende Ebenen in verschiedenen Entfernungen vorhanden sind, die den Schall auf denselben Punkt zurückwerfen, jedoch, je nach ihrer grösseren Entfernung, um so später.

Hiernach sind Sie nun vollkommen in die Lage gesetzt, aus dem Zeitunterschiede zwischen Blitz und Donner die Entfernung des Gewitters zu berechnen. In gleicher Weise sind Sie im Stande, aus dem Falle eines Steines die Tiefe eines Brunnens, eines Schachtes u. dgl. zu bestimmen. Sie brauchen blos den Moment zu markiren, wenn Sie den Stein fallen lassen, und jenen, wenn Sie den Schall des auffallenden Steines hören. Der Zeitunterschied wird Ihnen die Strecke annähernd angeben, die Stein und Schall durchliefen. Genauere Resultate erhalten Sie, wenn Sie den Stein durch einen Pistolenschuss ersetzen, weil die freie Fallzeit erst nach acht Secunden die Geschwindigkeit des Schalles erlangt, oder wenn man den Moment, wo man den Stein auf die Wasserfläche auffallen sieht, zum Ausgangspunkt der Beobachtung macht.

Zu den Erscheinungen der Reflexion gehören auch die sogenannten Flüstergalerien, wo, wenn an einem bestimmten Punkte des einen Endes so leise gesprochen wird, dass es der Nebenstehende nicht hört, oder wenigstens nicht versteht, ein am entgegengesetzten

Ende, und zwar ebenfalls an einem bestimmten Punkte, befindlicher Hörer das Geflüsterte deutlich vernimmt. Dieses Phänomen erklärt sich durch die Form der Wölbung, die in diesem Falle eine parabolische sein oder durch Zusammensetzung von geraden oder krummen Flächen die Wirkung einer solchen Wölbung erlangen muss. Der Parabel genannte Kegelschnitt hat, als Spiegel verwendet, die Eigenschaft, alle einfallenden Strahlen auf einen Punkt zurückzuwerfen.

Wir werden uns dieser Eigenschaft erinnern, wenn von den Formen der für musikalische oder rednerische Kundgebungen bestimmten Räumen die Sprache sein wird.

Ich will hier die Erklärung der Kegelschnitte einschalten.

Es gibt bekanntlich vier Kegelschnitte[1]), wie solche aus der, einen in der Mitte senkrecht durchschnittenen Kegel darstellenden Figur 96 ersichtlich sind.

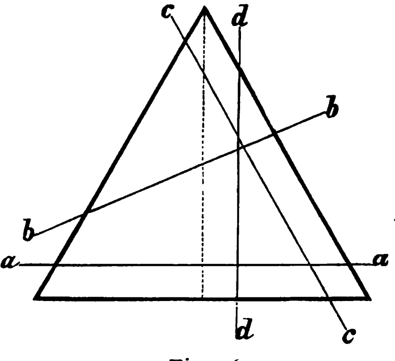


Fig. 96.

Diese sind: *a—a* Kreis: Schnitt parallel der Basis; *b—b* Ellipse: Schnitt schräg zur Basis; *c—c* Parabel: Schnitt parallel zur Seite; *d—d* Hyperbel: Schnitt parallel zur Axe.

Die Bahnen des Kreises und der Ellipse kehren in sich zurück, jene der Parabel und Hyperbel nie. Gestirnbahnen letzterer Art verlieren sich in die Unendlichkeit für immer.

Kehren wir zu unserem Gegenstande zurück.

Ist die Entfernung zwischen uns und der reflectirenden Fläche geringer als 34 Meter, so kann kein Echo entstehen, weil der reflectirte Schall mit dem ausgesendeten mehr oder weniger zusammenfällt, und es erfolgt das, was wir Nachhall nennen, und sich durch eine Verlängerung des Tones über seine beabsichtigte Dauer zu erkennen gibt, eine Erscheinung, der man in allen grösseren, leeren Räumen begegnet und die, zumal bei schneller Aufeinanderfolge ver-

---

[1]) Dieselben werden an Modellen gezeigt.

schieden hoher Töne, dadurch störend wird, dass wir bei jedem folgenden Tone den früheren zugleich noch mithören.

Den Nachhall ganz zu beseitigen, wäre jedoch ein Fehler, weil dadurch die Kraft, der Glanz des Tones gebrochen würde. Wie ungünstig für die Klangfülle der Stimme, wie der Instrumente jene gewissen mit Teppichen, Divans, Vorhängen, Portièren, Makartbouquets u. dgl., endlich mit Schleppkleidern vollgestopften Salons sind, davon weiss jeder Musiker zu erzählen, während die elendste Zweigulden-Geige auf manchem Kirchenchore wie eine Stradivarius klingt. Ohne Nachhall würde alle Musik wie im Freien, und häufig noch schlechter klingen.

In kleineren Räumen ist die Reflexion der Tonverstärkung nur förderlich, und kann höchstens bei Prüfung einer Stimme, oder eines Instrumentes, zu Täuschungen führen. Hier werden die Schallstrahlen in allen Richtungen von den Wänden so rasch zurückgeworfen, dass es nicht nur zu keinen gegenseitigen Störungen kommen kann, sondern auch die Stärke des Schalles, wo wir auch uns aufstellen mögen, keinen Unterschied wahrnehmen lässt.

Dem störenden Einflusse der Reflexion in grösseren Räumen unter allen Umständen zu begegnen, ohne die Schallkraft zu schädigen, gehört zu den schwierigsten Aufgaben der Architectur und die Studien darüber sind noch lange nicht abgeschlossen.

Wo es einen sogenannten »gut akustischen« Saal gibt — und es sind dies die wenigsten — nämlich einen Saal, der den Klang der Tonwerkzeuge begünstigt, in welchem man an allen Plätzen gleich gut hört und nirgends von einem Nachhall gestört wird, so ist er es zuverlässlich aus reinem Zufall geworden. — Die schönsten Theorien haben da noch zu keinem Ziel geführt. — Unser grosser Saal[1]) zählt zu den guten, die Verhältnisse der Galerien sind günstig; die Hermen der Logen, die kassetirte Decke, die Beleuchtung durch Sonnenbrenner tragen zur Brechung und Ablenkung der Schallstrahlen bei, ebenso auch die tiefe Lage des Sitzparterres. Für die daselbst Sitzenden ist das gefüllte Stehparterre von Wichtigkeit, wie folgender von mir beobachteter Fall beweist.

Es war eine Concursprüfung; das Sitzparterre sowie die Galerien waren vollgefüllt, das Stehparterre leer.

[1]) Der Gesellschaft der Musikfreunde in Wien.

Ich stand bei den rückwärtigen Sitzreihen und vernahm einen Nachhall, der sich dadurch erklärt, dass der die Schallstrahlen auffangende und dämpfende Menschenvorhang zwischen den Sitzenden und der Rückwand, mit ihren glatten Mauern, Spiegeln und Thüren, diesmal fehlte, die Reflexion hier also ihr Spiel ungehindert treiben konnte.

Die Theorie will solche Formen, damit der Schall an allen Punkten möglichst gleichzeitig ankomme.

Nach dieser Theorie ist das Wiener Carltheater mit seinen je höheren um so vorspringenderen Galerien angeordnet. Es ist bekannt, dass man dort nicht gut hört.

Man hat kuppelförmige Säle und Kirchen gebaut. Sie alle leiden am Nachhall, wenn auch nicht überall, doch stellenweise.

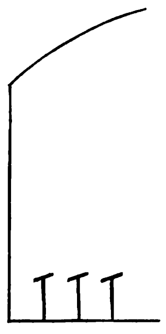
In für Musik bestimmten Räumen die parabolische Form anzuwenden, ist ihrer erwähnten Reflexionswirkungen wegen von vorneherein ausgeschlossen.



Fig. 97

Sie werden sich hievon durch ein sehr einfaches Experiment überzeugen, welches wir sofort ausführen wollen. Sie sehen hier zwei parabolische Spiegeln (Fig. 97). Ein solcher Spiegel wirft alle in ihn einfallenden Strahlen, seien es Licht-, Wärme- oder Schallstrahlen, nach dem schon erwähnten Reflexionsgesetze zurück, wonach der Strahl, wenn er im gleichen Medium bis an den Punkt der Reflexion ungehindert gelangt, genau im Einfallswinkel zurückgeworfen wird.

Da nun aber jeder Punkt einer Parabel eine gegen ihre Axe geneigte Ebene bildet, so werden alle Strahlen in der Axenrichtung zurückgeworfen werden, sonach in einem vor dem Spiegel liegenden Punkte sich vereinigen, folglich hier die summirte Energie ihrer Einzelwirkungen äussern. Man nennt diesen Punkt den Brennpunkt; denn wenn man statt Schallstrahlen Lichtstrahlen der Sonne, die bekanntlich zugleich Wärmestrahlen sind, auffängt, so würde es gefährlich sein, diesem Punkte mit dem Finger zu nahen, da sich hier feuerfangende Körper leicht entzünden. Machen wir nun den Versuch mit dem Schalle, und zwar mit einer sehr schwachen Quelle desselben, als welche wir abermals das Ticken unserer Taschenuhr benützen wollen. Bringen wir dieselbe in den Brennpunkt des einen Spiegels, in jenen der gegenüberstehenden aber einen mit Hörschlauch versehenen kleinen, trichterartigen Schallfänger, so werden wir das Ticken so deutlich hören, als hielten wir die Uhr an das Ohr; das Ticken wird aber sofort wesentlich geschwächt, unter Umständen selbst ganz unhörbar werden, sobald wir den Standpunkt des Schallfängers oder jenen der Uhr oder den des Spiegels ändern. Bringt man mit dem Schallfänger eine gespannte Membrane in Verbindung, so wird aufgestreuter Sand bei jedem Ticken der Uhr eine Bewegung sehen lassen.


Fig. 98.

Würde also in einem Musiksaale der Zuhörerraum eine Parabel bilden, so könnten nur die wenigen, im Brennpunkte befindlichen Personen gut hören. Bildete dagegen das Orchester einen parabolischen Raum, so müsste jeder der Musicirenden sich im Brennpunkte der Parabel befinden, was begreiflicherweise unausführbar wäre.

Oben leicht gekrümmte, sonst gerade, aus mitschwingungsfähigem Material construirte Schallwände (Fig. 98), wie sich der Wiener Männergesangverein solcher bei einigen seiner im Freien abgehaltenen Productionen bedient hatte, erwiesen sich als wirksam.

Theatersäle sind durch die vielen Abtheilungen und Logen, wie durch Draperien und Vorhänge der letzteren, endlich durch die geringe Reflexionsfähigkeit der Decorationen gegen Nachhall besser geschützt, dagegen in Bezug auf Tonfülle benachtheiligt.

Die Bayreuther Anordnung des Zuhörerraumes (Fig. 99) lässt keinen Nachhall zu, begünstigt die Darsteller, benachtheiligt aber das Orchester.

Das Thema der Schallreflexion ist ein unerschöpfliches, schon aus dem Grunde, weil sich leicht nachweisen lässt, dass der weitaus grössere Theil dessen, was wir hören, von reflectirten und nur der kleinere Theil von directen Schallwellen herrührt. Das berühmte Ohr

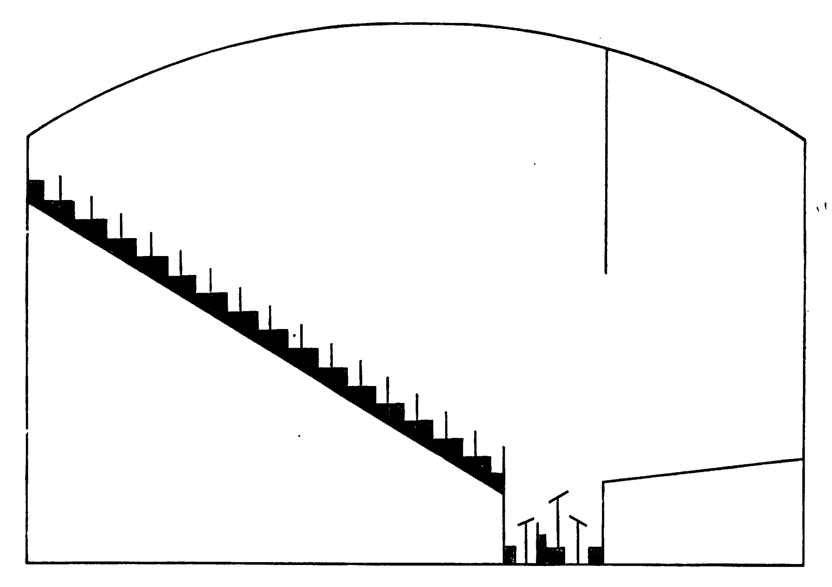


Fig. 99.

des Dionysius (in den Steinbrüchen von Syracus), das donnernde Getöse von, durch hohe Felswände eingeengten Wasserfällen, wie derjenige in der Lichtensteinklamm oder der Reussfall in der Schweiz; die 27 malige Wiederholung eines Pistolenschusses im Schlosse von Simonetta bei Mailand; der um die Kuppel der Peterskirche in Rom wandernde Schall; das Getöse eines durch einen Viaduct oder Tunnel fahrenden Eisenbahnzuges; die lauten Schläge der Schaufelräder, wenn ein Dampfschiff unter einer Brücke wegfährt; — alle diese und unzählige solcher Erscheinungen sind Producte der Reflexion. —

Ich breche unsere Betrachtungen über die Fortpflanzung des Schalles jetzt ab, um Sie mit dem Wesen der elektro-magnetischen

Anziehung bekannt zu machen, die heute ein wichtiges Hilfsmittel für akustische Untersuchungen geworden ist, und dessen wir uns in verschiedener Anwendung noch wiederholt bedienen werden. Die elektro-magnetisch bewegte Stimmgabel, die Sie zu Beginn des heutigen Vortrages functioniren hörten, bietet den Anlass, Ihnen den Gegenstand auseinanderzusetzen, damit Sie eine klare Vorstellung von der Wirkung und Verwendung dieser Kraft bekommen. Hiezu soll uns ein einfaches Modell (Fig. 100) dienen. Um einen weichen Eisenkern (*a*) wird isolirter Kupferdraht in mehreren Lagen gewunden. Ein beliebiges Ende dieses Drahtes wird mit einem Pole eines beliebigen galvanischen Elementes (*e*) leitend verbunden. Unter dem Kerne wird ein Glasröhrchen (*b*) befestigt, in welchem ein Drahtstift ohne Reibung ruht. [1]) Bringt man nun das freie Drahtende (*f*) mit dem anderen Pole in Berührung (Contact), so wird der Stift (oder die Lamelle) vom Kerne sofort an sich gerissen und so lange festgehalten, als die Berührung zwischen Draht und Pol währt. Wird diese aufgehoben, so fällt der Stift wieder ins Röhrchen zurück.

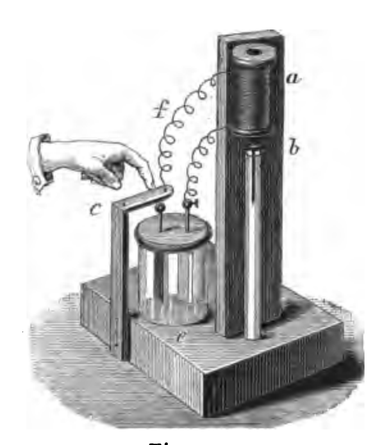


Fig. 100.

Dieser Fundamentalversuch lehrt uns:

1. Dass der Kern in dem Augenblicke der mit dem Elemente hergestellten Verbindung (Stromschluss) zum Magneten wird, und als solcher Eisen anzieht, und dass dieser Magnetismus, und damit die Anziehungskraft, aus dem Kerne sofort verschwindet, sobald der Contact gelöst ist.

2. Dass die galvanische Electricität es ist, die den Kern magnetisch macht, indem sie die ihn umgebenden Drahtwindungen durchfliesst, welches Durchfliessen bei jedesmaligem Stromschlusse erfolgt,

---

[1]) Man kann Röhrchen und Stift auch durch eine leicht federnde Lamelle aus Eisenblech ersetzen, die man in geringer Entfernung vom Kerne anbringt. Bei dieser Anordnung kann man dem Kerne selbstverständlich jede beliebige Lage geben.

demnach für jede einzelne Anziehungsfunction ein Stromschluss, mithin ein Contact erfordert wird.

Durch Versuche überzeugt man sich weiters, dass die Stromschlüsse (insolang das Element nicht erschöpft ist) beliebig oft und ausserordentlich rasch hintereinander wiederholt werden können. Letzteres wird durch den Umstand bewiesen, dass, um eine a^1-Gabel von 870 Schwingungen in elektro-magnetische Vibration zu versetzen, 435 Anziehungen der Zinken durch den Kern, sonach 435 Stromschlüsse und ebenso viele Unterbrechungen, und dadurch 435 Magnetisirungen und ebenso viele Entmagnetisirungen des Kernes, in einer Secunde erfolgen müssen.

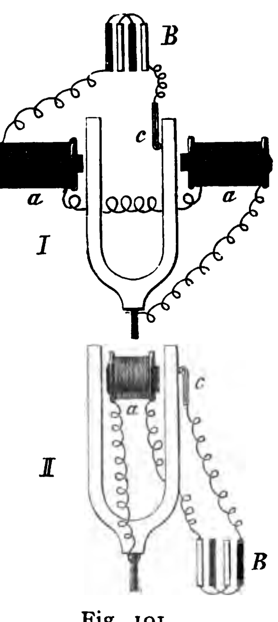


Fig. 101.

Lässt man die Stromschlüsse, beziehungsweise die Unterbrechungen, durch die Eigenschwingungen eines zugleich für Stromleitung wie für magnetische Anziehung geeigneten elastischen Körpers, also insbesondere eines Stabes oder einer Stimmgabel aus Eisen oder Stahl, bewirken, so werden diese Körper dadurch nothwendig selbst in Schwingung erhalten und demzufolge in der, der Zahl ihrer Eigenschwingungen entsprechenden Tonhöhe erklingen.

Den hiebei stattfindenden Vorgang erklärt die nebenstehende Zeichnung (Fig. 101 I).[1]) Die eine Drahtleitung führt von dem Pole + des Elementes B[2]) durch die Drahtspulen aa der Kerne zum Stiele der Stimmgabel, wodurch diese selbst leitend wird. Wird nun der mit dem Pole — verbundene Contact (c) der Gabelzinke bis zur Berührung genähert und in dieser Stellung erhalten, so erfolgt Stromschluss, und damit Anziehung der Zinken durch die, in Folge des

[1]) Die Anordnung Figur 101 II ist nur bei Gabeln mit weitem Zinkenabstand anwendbar.

[2]) Um Gabeln zu bewegen, müssen, je nach Bedarf des speciellen Zweckes, mehrere zu einer Batterie verbundene Elemente angewendet werden.

Stromschlusses magnetisch gewordenen Kerne. Da sich aber die Zinken, indem sie sich gegen die Kerne bewegen, vom Contacte entfernen, wird der Strom unterbrochen, der Kern entmagnetisirt, die nicht mehr angezogene Zinke schwingt zurück, kommt dadurch mit dem Contacte wieder in Berührung und der ganze Vorgang wiederholt sich so lange, als der Contact in seiner Stellung belassen wird. —

Dass man durch geeignete Verbindungen solche Schwingungen, beziehungsweise die Wirkung wechselweiser Anziehung und Unterbrechung, auch auf andere Körper übertragen und überhaupt mit dieser Kraft verschiedenartige Bewegungen hervorrufen und unterhalten kann, bedarf keiner weiteren Erklärung, und werden wir solchen Vorgängen im Laufe unserer Unterhaltungen noch wiederholt begegnen.

---

13. Vortrag.

(Fortpflanzung des Schalles in dichteren Mitteln. — Stehende Längsschwingungen. — Staubfiguren. — Rippungen.)

Nachdem wir gelernt haben, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft zu bestimmen, so wird es uns keine Mühe machen, alle übrigen schallverbreitenden Medien auf die Geschwindigkeit ihrer Leitungsfähigkeit hin zu untersuchen.

Diese Bestimmungen gehören mit zu den interessantesten, welche in der experimentellen Akustik vorkommen.

Mit den tropfbar-flüssigen Medien wollen wir uns nur kurz befassen, da diese Körper in der Musik weder als selbsttönende noch als schallleitende im Gebrauche sind.

Quell-, Fluss- und Meerwasser, Mineralwässer aller Art, Oele, Säueren verschiedenster Mischung wurden untersucht, und ergaben ein Leitungsvermögen, welches dasjenige der Luft zwischen 4·5 und 6·3 mal übertrifft, und zwar leitet Wasser verhältnissmässig am langsamsten unter den Flüssigkeiten, nämlich $4\frac{1}{2}$ mal. —

Die ersten Untersuchungen des Wassers auf sein diesfälliges Verhalten unternahmen die Physiker Colladon und Sturm 1826

im Genfersee, indem sie zwei auf eine bestimmte Distanz verankerte Schiffe benützten, um von dem einen eine grosse Glocke mit Hammer, von dem anderen ein grosses Hörrohr ins Wasser zu hängen. Mittels Pulverblitzen verständigten sie sich über den Moment des Anschlages der Glocke.

Später wurden bequemere Methoden ersonnen, um solche Bestimmungen auch im physikalischen Laboratorium durchzuführen. Die Ergebnisse derselben bestätigten die Richtigkeit der von den vorgenannten Physikern für das Wasser direct ermittelten Zahlen.

Durch directe Versuche in der Art, wie sie für Luft und Wasser durchgeführt wurden, ist die Schnelligkeit der Fortpflanzung in festen Körpern nur für das Eisen bestimmt worden, indem hiezu die mehrere tausend Fuss lange, zusammenhängende Eisenbarrière am Hydepark in London benützt wurde. Die Ausführung geschah einfach in der Weise, dass man an einem Ende gegen die Barrière einen starken Schlag führte und am anderen das Ohr an dieselbe legte, und den Zeitunterschied zwischen der Ankunft des Schalles durch die freie Luft und der durch das Eisen mass. Man fand, dass der Schall das Eisen 15 mal schneller durchlief. — Dieses durch ein directes Verfahren gefundene, an sich interessante Resultat erhält noch dadurch erhöhte Bedeutung, dass es den Massstab für die Zuverlässlichkeit anderer Methoden abzugeben geeignet ist. Zu solchen Methoden, die sich in jedem Zimmer leicht durchführen lassen, und nicht erst langer Leitungen bedürfen, gehören vorzugsweise die ältere von Chladny, welche die Kenntniss der Wellenlänge, beziehungsweise der Schwingungszahl des betreffenden Tones in der Luft nach Beurtheilung der Tonhöhe mittels Sonometers durch das Ohr zur Voraussetzung hat, während die neuere Methode keine dieser Voraussetzungen erheischt. Letztere eignet sich ausserdem zugleich, um Gase in dieser Beziehung zu untersuchen, und insbesondere um das Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles zwischen Gasen und dem Glase zu bestimmen, was einfach durch directes Ablesen an einem Längenmasse bewirkt wird; endlich um die Schwingungszahl des Tones des untersuchten Körpers durch Rechnung in ebenso genauer als einfacher Weise zu ermitteln.

Man verdankt diese ausgezeichnete Methode, mit welcher wir noch wiederholt zu thun haben werden, da sie auch bei Nach-

weisungen anderer Art vorzügliche Dienste leistet, dem deutschen Physiker, Professor Kundt.

Mit welcher dieser beiden Methoden man operiren will, muss man die Theorie der stehenden Longitudinalschwingungen kennen.

Wie stehende Wellen entstehen, wissen Sie. Dies geschieht, wenn eine reflectirte Welle mit einer ihr entgegenkommenden zusammentrifft. Es bilden sich Knotenpunkte, Punkte der Ruhe, zwischen welchen, so lange die Erregung fortdauert, die Molecule hin- und herschwingen. Wird nun ein elastischer Körper von begrenzter seitlicher Ausdehnung, wie Saite, Stab, Röhre, durch Stoss oder Reibung in Längsschwingungen versetzt, so werden sich, je nach der Spannung, beziehungsweise nach der Art der Befestigung wie der Erregung, ein oder mehrere solcher Ruhepunkte bilden.

(Selbstverständlich bleiben die Luftsäulen hier, wo es sich um die Schnelligkeitsbestimmung der Schallbewegung in festen Körpern handelt, ausser Betracht.)

Im einfachsten Falle, nämlich bei Bildung nur eines Knotenpunktes, befindet sich derselbe in der Mitte des klingenden Körpers, weshalb derselbe eben nur hier befestigt werden kann und muss, ohne die Schwingungen zu hindern. Selbstverständlich können an den freien Enden nur halbe Bäuche, d. h. Stellen der grössten Bewegung liegen. Die Länge eines solchen Stabes oder Rohres ist also gleich der Länge zweier halben, beziehungsweise einer ganzen stehenden Welle des Grundtones, welchen dieser Körper bei longitudinaler Erregung und vorbesagter Befestigungsart erzeugt.

Die Wellenlänge des Tones wird also in diesem Falle gleich sein der Länge des tönenden Körpers.

Um den nächsten Oberton hervorzurufen, muss die Befestigung im ersten und dritten Viertheil der Länge erfolgen. Der Ton des also befestigten Stabes oder Rohres bildet die Octave des Grundtones mit der zweifachen Schwingungszahl und halben Wellenlänge desselben.

Wenn wir nun finden, dass die Wellenlänge, die einem bestimmten Tone in der Luft entspricht, in der Länge des Körpers x mal enthalten ist, so werden wir daraus nothwendig schliessen, dass

die Welle den Körper x mal schneller durchlauft als die Luft. Dieses ist die Chladny'sche Methode, und um sie anzuwenden, nämlich, um mittelst derselben die Wellenlänge des betreffenden Longitudinaltones zu erfahren, müssen wir die Höhe dieses Tones, beziehungsweise seine Schwingungszahl bestimmen können.

Wiederholen wir seinen Versuch mit dieser Glasröhre. Wir rufen deren Grundton hervor, indem wir sie in der Mitte festhalten und mit einem nassen Wolllappen der Länge nach reiben. Die Länge derselben beträgt genau 1985 Millimeter, ihr erster Longitudinalton ist, wie der Vergleich mit dem Sonometer lehrt, ein tieferes e^3 von 2585 Schwingungen, statt 2607, der Schwingungszahl des richtigeren e^3. Dividiren wir durch diese Schwingungszahl die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft bei 20° C. = 342 Meter, so erhalten wir die Wellenlänge = 132·3 Millimeter. Da diese Zahl in der Länge unserer Glasröhre = 1985 Millimeter 15 mal enthalten ist, so folgt daraus, dass der Schall im Glase 15 mal schneller fortschreitet als in der Luft.

Dem berühmten Entdecker der Längsschwingungen war es aber nicht gegönnt, die weiteren Consequenzen zu ziehen, auf welche ihn ein innen verstaubtes und in diesem Zustande geriebenes, geschlossenes Glasrohr hätte führen müssen.

Dieses war Kundt vorbehalten. Bei seiner Methode bedarf es der Kenntnis der Tonhöhe, beziehungsweise deren Schwingungszahl nicht, um die Wellenlänge und daraus die relative Schallgeschwindigkeit zwischen Glas und Luft oder anderen Gasen zu bestimmen.

Wenn wir Staub von Korkfeilicht, Bärlappsamen (Lycopodium) oder Kieselsäurepulver an der Innenwand eines Glasrohres vertheilen und dessen Grundton in soeben gezeigter Weise hervorrufen, so wird sich, — wenn beide Enden der Röhre gut verschlossen sind, (sonst nicht) — der während des Streichens heftig aufwirbelnde Staub in 16[1]) gleich lange Abtheilungen von derselben eigenthümlichen symmetrischen Gestalt ordnen. Und diese Zahl von Abtheilungen, welche das Verhältnis der Fortpflanzung des Schalles zwischen Glas und

[1]) Allerdings müssen Länge und Weite der Röhre einem gewissen Verhältnisse entsprechen. In engen Röhren entstehen um $1/2$ bis 1 Abtheilung mehr.

der von der Röhre umschlossenen Luft ausdrückt, wird in solchem Falle sich stets bilden, gleichviel welches die Länge der Röhre ist. Die Länge einer solchen Staubabtheilung entspricht genau der Wellenlänge des Rohrtones in der Luft, und aus dieser lässt sich nun ohne Mühe die Schwingungszahl, d. h. die Höhe des Tones bestimmen.

Ersetzen wir die Luft in der Röhre durch ein beliebiges Gas, so wird die Zahl der sich bildenden Staubabtheilungen, je nach der Leitungsfähigkeit der betreffenden Luftart, eine verschiedene sein, und diese Zahl gibt an, um wie viel schneller oder langsamer der Schall in dem untersuchten Gase fortschreitet, als in der Luft.

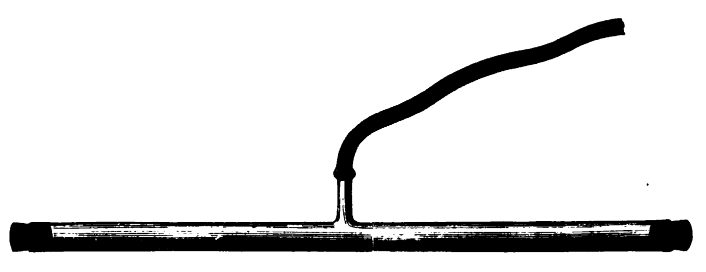


Fig. 102.

Da Leuchtgas uns zur Hand ist, wollen wir das Experiment mit diesem sofort ausführen. Wir lassen das Gas in unsere Röhre (Fig 102) eintreten, verschliessen und reiben sie. Es haben sich nur 12 Staubabtheilungen gebildet, was beweist, dass der Schall im Leuchtgase rascher fortschreitet, weil die Staubwellen länger geworden sind. Das Verhältniss ist also, wenn wir Luft = 1 setzen, wie 1 : 1·2, in welchem der Schall in der Luft langsamer fortkommt als im Leuchtgase, und es wird mithin der Schall, wenn er (bei + 20° C.) in der Luft 342 Meter zurücklegt, im Leuchtgase 410·4 Meter, — und ich füge hier noch ein paar andere Daten bei — im leichteren Wasserstoffgase 1210, dagegen im schwereren kohlensaueren Gase nur 253·6 Meter in gleicher Zeit durchlaufen. [1])

[1]) Es schreitet also der Schall, wenn Luft = 1 gesetzt wird, in Kohlensäure = 0·8 mal langsamer, im Leuchtgas (kalt) = 1·2 mal schneller, und im Wasserstoffgas = 3·56 mal schneller fort als in der Luft. Wird die mit Leuchtgas gefüllte Röhre erwärmt, so vermindert sich die Zahl der

Um nun auch andere feste, aber undurchsichtige Körper mittelst dieser Methode auf ihre Schallfortpflanzung zu untersuchen, muss das Verfahren abgeändert werden, weil man die Staubwellen in einem Metallrohre nicht sehen kann, volle Stäbe aber zu diesen Versuchen sich überhaupt nicht eignen. Dass dieses Verfahren ebenso genaue Resultate ergibt, davon überzeugt man sich, wenn man in dieser Variante die Geschwindigkeit des Schalles im Glase misst, weil sich die vollkommene Uebereinstimmung mit dem nach der ersten Methode gefundenen Ergebnisse herausstellt.

Wir haben hier eine Eisen- und eine Messingröhre, einen Tannen- und einen Eichenstab. Sie alle haben genau die Länge unseres Glasstabes = 1985 Millimeter. — Führen wir mit einem beliebigen dieser Körper, beispielsweise mit der Messingröhre, das Experiment durch.

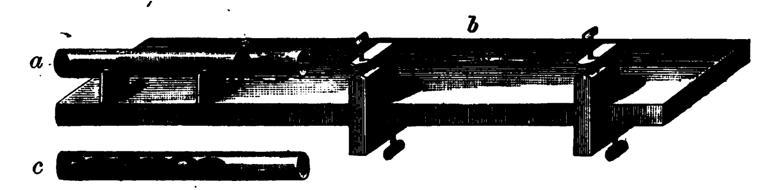


Fig. 103.

Mit ihrem, mit einer Korkscheibe versehenen Ende führen wir sie in eine, innen mit Korkfeilicht bestaubte, und am entgegengesetzten Ende mit einem Pfropf fest verschlossene Glasröhre *a* (Fig. 103), welche wir das Luftrohr nennen wollen. Wir reiben die der bequemeren Handhabung wegen statt in der Mitte, in ihrem ersten und dritten Viertheil festgehaltene Messingröhre (*b*) mit einem beharzten Lederlappen und sofort mit dem Erscheinen des Tones (welcher in Folge obiger Befestigungsart die Octave desjenigen Tones gibt, den die Röhre hören lässt, wenn sie blos in der Mitte festgehalten wird)

Abtheilungen bis zehn und die Geschwindigkeit wächst demnach bis 1·6. Dieses Resultat stimmt vollkommen mit jenem unserer a^2-Messingpfeife, welche mit kaltem Gas um eine kleine Terz steigt, mit entzündetem aber um eine kleine Sext, nämlich =

$$a^2 : c^2 = 2088 : 1740 = 1{\cdot}2,$$
$$a^2 : f^2 = 2784 : 1740 = 1{\cdot}6.$$

bilden sich am Boden des Luftrohres die Staubabtheilungen von der in *c*, und vergrössert in Figur 104, dargestellten Form.

Ziehen wir jetzt die Consequenzen unseres Experimentes. Unsere Messingröhre gibt ihren zweiten Theilton, d. i. die Octave des Grundtones. Die Wellenlänge dieses Tones ist, nach dem früher Vorgetragenen, gleich der halben Länge der Röhre, also 992·5 Millimeter. — Die Länge einer Staubabtheilung im Luftrohre ist dagegen gleich der Wellenlänge desselben Tones in der Luft. Es wird also die Schallgeschwindigkeit im Messing im Verhältnisse zu jener in der Luft um so vielmal grösser sein, als Staubabtheilungen in der halben Länge der Messingröhre aufgehen.



Fig. 104.

Messen wir jetzt die Länge einer solchen Staubabtheilung möglichst genau, so finden wir sie mit 92·3 Millimeter. — Damit in die halbe Länge der Messingröhre dividirt, bekommen wir die Zahl 10·75, welche uns sagt, dass der Schall im Messing sich $10^3/_4$ mal schneller fortpflanzt, als in der Luft.

Würden wir die Röhre in ihrer Mitte befestigen und dadurch ihren Grundton hervorrufen, so würde die Staubabtheilung doppelt so lang werden, der Versuch daher das gleiche Resultat ergeben.

Wollen wir in gleicher Weise noch mit der Eisenröhre oder den beiden Holzstäben experimentiren, so werden wir die Längen der Staubabtheilungen mit 66·5, 58·3 und 73·1 finden, wenn wir sie mit der Eisenröhre, dem Tannen- und dem Eichenstabe hervorriefen. Die Schallgeschwindigkeit ist demnach grösser als in der Luft und zwar im Eisen 15·22 mal, im Tannenholz 16·95- und im Eichenholz 13·66 mal.[1]) Das Tannenholz leitet also 1·13 mal besser als Eisen, 1·24 mal besser als Eichenholz, und 1·58 mal besser als Messing,

[1]) Ebenso wie die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in der Luft, variiren die Befunde der Physiker bezüglich des Fortschreitens des Schalles in festen Körpern. So pflanzt sich der Schall, verglichen mit der Geschwindigkeit in der Luft bei 0° C., fort, und zwar im:

Es wird sonach der Schall im Messing 3676·5, im Eichenholze 4671·7, im Glase 5130, im Eisen 5205·2 und im Tannenholze 5795·9 Meter durchlaufen, während er in der Luft 342 Meter weit fortschreitet.[1])

Da nun aus der Wellenlänge in der Luft die Schwingungszahl, und dadurch die Höhe eines jeden Tones sich ermitteln lässt, so erkennt man leicht die Vorzüglichkeit dieser, durch Mannigfaltigkeit, Einfachheit und Genauigkeit ihrer Resultate sich auszeichnenden Methode.

	Nach Angabe von							Specifisch. Gewicht
	Müller (nach Chladny)	Kundt	Wertheim	Tyndal	Stefan	Münch	Hessler	
Kautschuk, langsamer . . .	.	.	.	.	6·8	.	.	.
Wachs, weich, schneller .	.	.	.	.	2·0	.	.	0·96
» hart » .	.	.	.	.	4·0	.	.	0·96
Blei » .	.	.	4·25	3·72	.	4·0	,	11·39
Fischbein » .	6·66	.	.	.	.	.	.	1·24
Gold » .	.	.	6·42	5·23	.	6·0	.	14·7
Zinn » .	7·5	.	7·48	.	.	.	7·5	7·3
Platin » .	.	.	8·46	8·7	.	8·0	.	21·0
Silber » .	9·0	.	8·08	7.8	.	8·0	9·0	10·5
Thon, gebrannt » .	.	.	.	.	.	.	10·0	2·6
Messing » .	10·66	10·87	.	.	.	.	.	8·5
Kupfer » .	12·0	11·96	11·17	10·68	.	11·0	12·0	9·0
Glas » .	16 66	15·24	.	.	.	.	17·0	2·5
Eisen » .	16·66	.	15·1	15·4	.	15.0	10·5	7·6
Stahl » .	16·66	15·34	15·1	15·34	.	.	.	7·9
Eichenholz » .	10·66	.	.	12·62	.	.	.	0·65
Tannenholz » .	18·0	.	10·9	10·9	.	.	17·0	0·48

(Die Schnelligkeit, mit welcher ein Stoss sich in den Nerven, von der Erregungsstelle bis zum Gehirn, fortpflanzt, beträgt nach Stefan 30—40 Meter; sie ist demnach 11·3 bis 8·5mal geringer als in der Luft.) Aus vorstehender Tabelle ersieht man zugleich, dass im Verhältnisse zu ihrer, durch deren specifische Schwere ausgedrückten Dichtigkeit, sehr wenig elastische Körper, wie Blei, Gold, Platin, den Schall schlechter leiten, als solche, die im Verhältnisse zu ihrer geringeren Dichtigkeit (beziehungsweise specifischen Schwere) elastischer sind, wie z. B. Eisen, Stahl, Holz.

[1]) Bei Erwärmung des Luftrohres werden, wie schon erwähnt, auch die Staubabtheilungen länger werden, weil der Schall in der wärmeren Luft schneller fortkommt. Die Erwärmung der Tonröhre oder des Stabes dagegen hat auf die Länge der Abtheilung soviel wie gar keinen Einfluss.

Darüber endlich, wie die Staubabtheilungen und die, gegen die Mitte derselben immer deutlicher ausgeprägten, rippenartigen und daher auch Rippungen genannten Einkerbungen oder Riefen sich bilden, sowie über den Grund des heftigen Aufwirbelns des Staubes in der Mitte der Abtheilungen, muss ich Sie auf spätere Ausführungen, wenn von den Bewegungen der Luft in Röhren die Rede sein wird, vertrösten. Heute hierüber nur einige Andeutungen.

Dass die Staubabtheilungen durch die Interferenz der vom verschlossenen Ende des Luftrohres zurückgeworfenen Wellen des tönenden Körpers entstehen, ist leicht zu erkennen. Es müssen sich dadurch bei gleicher Länge beider Röhren ebenso viele stehende Wellen im Luftrohre bilden, als der Schall die Materie der Tonröhre schneller durchlauft wie die Luft. Setzen wir den Fall, dieses Verhältniss sei

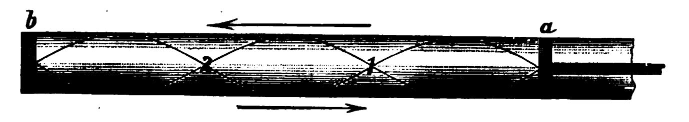


Fig. 105.

wie 3 : 1, so wird die erste, von *a* (Fig. 105) ausgesendete und bei *b* zurückgeworfene Welle der Tonröhre mit der mittlerweile bei 2 angelangten, folgenden vierten directen Welle daselbst interferiren; desgleichen die bis 1 fortgeschrittene reflectirte Welle mit der bei 1 angelangten fünften directen. Es werden sich demnach zwischen *a*—1, 1—2 und 2—*b* stehende Luftwellen bilden, ein Vorgang, der völlig analog ist der Bildung stehender Seilwellen. Bewegen wir das Seilende dreimal so schnell hin und her, als zur Ausbiegung des Seiles in seiner vollen Länge erfordert würde, so werden sich sofort drei stehende Wellen bilden.

Da nun der grösste Bewegungswechsel stehender Luftwellen in der Mitte zwischen je zwei Knotenpunkten — als welche auch die Verschlüsse des Luftrohres anzusehen sind — stattfindet, dieser in den Knotenpunkten jedoch gleich Null ist, so werden sich die, durch die Bewegung in den Bäuchen nach beiden Seiten fortgeführten Staubtheilchen hier anhäufen. —

Was die Rippungen betrifft, die man auch bei jeder mit einem stark befeuchteten Wollzeuge geriebenen Glasröhre als — aller-

dings augenblicklich wieder verschwindende — Wasserwülste beobachten kann (Fig. 106)[1]), so entstehen dieselben in Folge der Erschütterungen, welche die Masse der Röhre durch deren Dehnungen und Zusammenziehungen beim Durchlaufen einer jeden Tonwelle erleidet.

Diese, uns von früheren Versuchen her bekannten, axialen Verlängerungen der longitudinal erregten Röhren üben auf die in der Staubröhre enthaltene Luft jene Stösse aus, durch deren Reflexion und Interferenz die Staubabtheilungen entstehen, und welche Stösse man mit dem an das Verschlussende dieser Röhre gelegten Finger sehr wohl empfinden kann.

Der Grund, warum sich diese Rippungen am deutlichsten in der Mitte der Staubfigur ausbilden, beruht in der zuvor angedeuteten, in den Schwingungsbäuchen ihr Maximum erreichenden Energie der Bewegungen, welche die, durch die directen und reflectirten Stösse hin- und hergetriebenen Lufttheilchen, daselbst erfahren. Das heftige Aufwirbeln des Pulvers in der Mitte der Figuren endlich ist die Folge der daselbst stattfindenden grössten Bewegung der zwischen den Knotenpunkten entgegengesetzt hin- und zurückschwingenden Lufttheilchen. Inwiefern an diesem Vorgange auch transversale Erschütterungen des Luftrohres mitwirken, wird den Gegenstand von Erörterungen bilden, zu welchen wir erst viel später gelangen werden, und es sei zum Schlusse hier nur noch darauf hingewiesen, wie sehr Kundt's Methode sich auch dazu eignet, die Uebereinstimmung der Längen offener, oder der zweifachen Längen gedeckter Pfeifen mit den Längen der, durch Reibung von Röhren oder Stäben, die denselben Ton wie die Pfeife geben, hervorgerufenen Staubabtheilungen darzuthun. Dass hierbei

Fig. 106.

[1]) Um sie gut zu sehen, muss man durch das Glas gegen das Licht schauen.

auf die schon erwähnte, und später noch eingehender zu erörternde Correction der Pfeifenlänge (wegen der über dieselbe hinausschwingenden Luftsäule) Rücksicht genommen werden muss, ist selbstverständlich. Würde diese vernachlässigt, so erschiene die Staubwelle zu lang. Wir können uns hievon sofort überzeugen. —

Bringen wir den Ton einer offenen Pfeife (oder Röhre) mit dem Longitudinaltone einer unserer Röhren in Einklang, und vergleichen wir die Länge der von letzteren hervorgerufenen Staubfigur mit der Länge der Pfeife oder Röhre, so zeigt sich, dass letztere kürzer sind als die Staubfigur. Dasselbe Resultat ergibt selbstverständlich die doppelte Länge einer gedeckten Pfeife. Aus der Differenz dieser Längen nun lässt sich der numerische Werth der Correction genau berechnen und für ganze Reihen entwickeln.

Eine andere, einfachere, allerdings minder präcise Methode, die Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit in festen Körpern zu bestimmen, besteht darin, dass man den Longitudinalton der Röhre feststellt, hierauf eine gedeckte Röhre auf denselben Ton stimmt, und nun durch die zweifache Länge der Röhre (gleich der Wellenlänge des Tones) die Länge der Röhre dividirt. Der Quotient zeigt, um wie viel der Schall schneller die Röhre durchlauft als die freie Luft. — Dass auch bei dieser Methode auf die Correction der Luftsäule der Röhre Bedacht genommen werden muss, bedarf nicht erst der Erinnerung.

---

14. Vortrag.

(Die Entstehung des Klanges.)

Wir befinden uns nunmehr vor der Frage: »Wie entsteht der Klang?«

Um Schall zu erregen, eignet sich jeder Körper mit jedem Körper — gleichviel welchen Aggregatzustandes. Stösst ein fester Körper gegen einen festen, wie beispielsweise Stein auf Stein, stösst er auf einen flüssigen, wie beim Schlag etwa mit einem Brett auf eine Wasserfläche, stösst er gegen einen gasförmigen, wie beim Hiebe

mit einer Gerte durch die Luft; oder stösst ein flüssiger Körper auf einen festen, oder flüssigen, oder gasförmigen, wie der Regentropfen, der aufs Dach, oder auf eine Wasserfläche aufschlägt, oder erschüttert ein Flüssigkeitsstrahl, vermöge gewaltsamer Ausströmung aus enger Oeffnung, wie bei Springbrunnen oder Feuerspritzen, oder als Savart'scher sanfter Ausflusston die Luft; stossen endlich luftförmige Körper gegen feste oder flüssige, wodurch die von Orkanen entfesselten, erschütternden Naturconcerte zu Land oder zur See entstehen, oder stösst Luft gegen Luft, wie bei den Pfeifen und Sirenen, so entsteht in allen diesen Fällen Schall; ja, er ist nicht zu vermeiden, selbst wenn wir mit scheinbar ganz unelastischen Stoffen, wie plastischer Thon, weiches Wachs, klebrige Materien, oder mit Wolle, Haaren, weichen Stoffen u. dgl. hantiren, kurz: wo Massen sich bewegen, muss Schall erfolgen.

Um aber zu musikalisch-praktischer Verwendung taugliche Klänge zu erzeugen, bedarf es elastischer Körper von solcher Gestalt, die ihnen gestattet, regelmässige, d. h. periodisch wiederkehrende Schwingungen mit einer gewissen Schnelligkeit auszuführen. Die hiezu geeigneten Körper müssen also vor Allem möglichst elastisch sein. Jene sind dies am meisten, die den Schall am besten leiten, und dabei die moleculäre Beschaffenheit besitzen, um die für die Klangbildung günstigste Form anzunehmen. In erster Reihe stehen diesfalls die festen Körper, wie Metalle, Holz, Glas, Steine.

Von gleicher Wichtigkeit für die musikalische Klangbildung sind die gasförmigen elastischen Körper, und darunter vor Allem die von Röhren umschlossene atmosphärische Luft.

Diesen Schallquellen von eminenter Bedeutung reihen sich die gespannten Membranen an, die, wie wir später sehen werden, nach einer Richtung alle Schallquellen in Bezug auf künstlerische wie seelische Wirkung überragen können. Aber auch tropfbar-flüssige Körper, ja selbst unwägbare, immaterielle Stoffe, wie das Licht oder die langsamere Bewegungsform derselben Undulation: die Wärme, sind geeignet, musikalischen Klang zu erzeugen.

Unter diesen Schallquellen gibt es jedoch viele, die, so wichtig und interessant sie vom wissenschaftlichen Gesichtspunkte sein mögen, doch zur Klangerzeugung für praktische Zwecke, zumal für jene der Musik, wenig geeignet erscheinen, theils wegen der Complicirtheit

oder Unhandsamkeit der dazu erforderlichen Vorrichtungen, theils wegen ihrer Tonarmuth, oder endlich wegen der Unbeständigkeit ihrer Tonhöhe. — Die Auslese von, für Musik verwendbaren Schallquellen ist eine verhältnissmässig sehr kleine, denn sie beschränkt sich auf die Saite, auf die Luftsäule, auf Stäbe und auf Membranen, und selbst von den verschiedenen Arten, wie man diese Körper zum Klingen bringen kann, werden nur jene benützt, die die einfachste und bequemste Hervorrufung des Klanges gestatten.

Diesen Körpern und ihrer tauglichsten Verwendung werden wir selbstverständlich die eingehendste Würdigung zu widmen haben, ohne dabei die mit denselben Körpern mögliche Darstellung von Klängen auch anderer Art von der Betrachtung auszuschliessen.

Eine minder ausführliche Behandlung werden die übrigen Klangquellen erfahren müssen, die wir mit Rücksicht auf ihre geringere Eignung zu musikalischen Zwecken exotische nennen wollen, ohne sie indessen ganz zu ignoriren, was aus mehr als einem Grunde kaum gerechtfertigt erschiene; denn, einmal sind sie — jede in ihrer Art — von wissenschaftlichem Belange, und bieten als Experimentalobjecte besonderes Interesse; auch würden meine so wissbegierigen Hörer es gewiss und mit Recht als eine Beeinträchtigung empfinden, wenn ihnen über die Beschaffenheit solcher Schallquellen Mittheilungen — und wären es selbst nur auf Andeutungen beschränkte — vorenthalten würden.

Wir wollen also von derartigen ungewöhnlichen Klangerzeugern die wichtigsten wenigstens insoweit kennen lernen, um von ihrer Beschaffenheit wie von ihren Wirkungen eine deutliche Vorstellung zu erlangen.

Vor mancher dieser Erscheinungen werden wir wie vor einem Räthsel stehen. Es wird aber alsbald aufhören für uns eines zu sein, sobald wir uns erinnern, dass ohne periodische Erschütterungen der Luft eine objective Gehörsempfindung überhaupt nicht entstehen kann, es also in jedem noch so räthselhaft scheinenden Falle in letzter Auflösung nothwendig Luftstösse sein müssen, in welchen wir den Grund der Erscheinung zu suchen haben.

Was nun die Frage nach der, zur Hervorbringung klangbildender Schwingungen geeignetsten Gestalt betrifft, so wird im Allgemeinen diejenige es sein, bei welcher eine oder zwei Dimensionen sehr

klein sind, und unter diesen wieder jene, bei welcher die Länge die beiden anderen Ausdehnungen überwiegt.

Wir sehen auch in der That, dass fadenförmige, wie Saiten, oder dieser Form nahekommende Körper, wie Stäbe, dann von Röhren umschlossene Luftsäulen in der Musik zur Erzeugung von Klängen schon aus dem Grunde in erster Linie in Betracht kommen, weil sie das ganze Tongebiet nach Höhe und Tiefe beherrschen, während Körper, an welchen, wie bei flächenförmigen, zwei Dimensionen vorwiegen, vermöge ihres geringen Tonumfanges, der kurzen Dauer ihres Klanges, und der minderen Bestimmtheit ihrer Tonhöhe, an die Bedeutung der Tonerreger ersterer Art nicht heranreichen. —

Kein Körper tönt, beziehungsweise schwingt aus eigenem Antriebe; er muss durch eine äussere Einwirkung aus seiner Gleichgewichtslage gebracht, und dadurch in Bewegung gesetzt werden. Je nach der Natur dieser Körper wird die Angriffsart eine verschiedene sein. Wir werden bei dem einen durch Schlag oder Stoss, beim anderen durch Reibung, beim dritten durch Zerrung die Schwingungen einleiten und unterhalten. Bei manchen, wie beispielsweise bei den Saiten, werden wir, je nach der beabsichtigten Wirkung, die Wahl zwischen mehreren dieser Erregungsarten haben. Wir werden einige dieser Körper, besonders die faden- und stabförmigen, je nach Bedarf ebenso in Quer- wie in Längsschwingungen versetzen können, ja unter Umständen es mit beiden Bewegungsarten gleichzeitig zu thun haben, während die flächenförmigen Schwingungen letzterer Art weniger begünstigen; andere dagegen, wie Luftsäulen, gestatten keine Transversalbewegung, da sie weder gestrichen, gezerrt, noch in der Querrichtung gestossen werden können.

Wenn wir von »tönenenden Körpern« sprechen, so geschieht dies im uneigentlichen Sinne, indem wir an Stelle der Ursache die Wirkung setzen; denn, streng genommen, gibt es keine Körper, welche tönen. Es gibt nur bewegte Körper, deren Bewegungen derart beschaffen sind, dass sie regelmässige, moleculäre Verdichtungen und Verdünnungen erzeugende Erschütterungen der Luft bewirken, die, zum Ohre geleitet, in den verschiedenen Theilen des Gehörorganes jene Thätigkeit hervorrufen, aus deren Zusammenwirken sich in der Seele das concrete Bild des jeweilig resultirenden Klanges gestaltet.

Dieser physiologisch-psychologischen Auffassung der Schallentstehung, die durch den analogen Process der Licht-, beziehungsweise Farbenempfindung gestützt wird, müssen wir aber hier entsagen, wo es sich darum handelt, die äusseren Schwingungserscheinungen der Körper, und die Gesetze, nach welchen sie erfolgen, zu erforschen.

Wir werden also diese Erscheinungen vom ausschliesslich physikalischen Gesichtspunkte betrachten, und demnach den Schall, den diese Körper durch ihre Schwingungen erzeugen, mit allen ihn charakterisirenden, specifischen Unterscheidungsmerkmalen als ein unmittelbares, reales, mithin objectives Product des betreffenden Körpers ansehen.

Diese physikalische Betrachtungsweise führt uns nothwendig zur Frage, was der letzte, eigentliche Grund dessen ist, was wir als Klang vernehmen?

Dass dazu oscillatorische, d. i. pendelartig hin- und herschwingende Bewegungen der Körper selbst nicht erfordert werden, beweist die Scheibensirene, die Sie bereits kennen, und noch prägnanter das Ihnen ebenfalls bekannte Savart'sche Zahnrad. Weder die Papp- oder Metallscheibe, noch das Zahnrad können in der Art, wie sie in diesen Apparaten zur Anwendung gelangen, als schwingende Körper angesehen werden; sie rotiren, oscilliren aber nicht.



Fig. 107.

Ein gleiches ist der Fall bei der, »Wieger« oder, nach seinem Erfinder, »Trevelyan-Instrument« genannten Vorrichtung (Fig. 107), die wir jetzt in ihrer Thätigkeit beobachten wollen. Eine mit einer Kerbe und Handhabe versehene Metallmasse, ziemlich erwärmt und auf ein Stück Blei gelegt, fängt an sich hin- und herzuwiegen, wobei Töne entstehen, die dem Tempo der Bewegungen entsprechen und die höher werden, wenn wir auf die Masse oder Stange einen Druck üben (oder sie durch ein Gewicht beschweren).

Diese Bewegungen werden durch die Repulsionen des Bleies eingeleitet und unterhalten, welches, da es ein schlechter Wärmeleiter ist, an der Stelle, wo es von dem warmen Metalle berührt wird, sich sofort aufbläht und demzufolge die aufliegende Masse emporschleudert. Dadurch aber gelangen beide Körper wieder ausser Berührung, das Blei gibt die empfangene Wärme ab und nimmt die ursprüngliche Gestalt an. Da dieser Vorgang zwischen beiden Kanten wechselweise stattfindet, so entsteht der zur Klangbildung erforderliche Isochronismus der Berührungsimpulse. Durch einen auf den »Wieger« geübten Druck vermindern wir die Strecke, und damit die Zeit der Berührungswiederholungen; dadurch wächst die Schwingungszahl, beziehungsweise die Tonhöhe. — Eigenschwingungen vollführen aber weder der Wieger noch der Bleiklotz. —

Auch die sogenannten Riefentöne, von welchen der erstbeste Leinwandeinband eines Buches, wenn man mit dem Fingernagel darüber gleitet, ein einfaches Beispiel liefert, gehören in die Kategorie von Klanghervorbringungen, die augenscheinlich nicht auf Schwingungsbewegungen beruhen. —

Bei Erforschung unserer Frage wird uns der analytische Weg am ehesten zum Ziele führen. Stellen wir den Satz auf: das Endergebniss unserer Untersuchung müsse in jedem Falle die Erkenntniss sein, dass aller Klang durch Stösse entsteht, so werden wir blos jene Fälle darauf zu prüfen haben, welche wir nicht sofort als zweifellose, mithin einer weiteren Beweisführung gar nicht bedürftige erkennen.

Dass Saiten oder Stäbe bei jeder Ausbiegung die Luft stossen, dass diese Schwingungen, wenn diese Körper mit einer Resonanzfläche verbunden sind, zugleich auf diese Stösse ausüben, wodurch diese Flächen zu Mitschwingungen veranlasst werden, die ebenfalls die Luft stossen; dass solche Secundärschwingungen, wenn sie auf Hohlräume wirken, wie dies bei den Klangkästchen der Stimmgabeln der Fall ist, stehende Luftwellen erzeugen, die man in diesem Falle füglich Tertiärschwingungen nennen könnte, und die ebenfalls Luftstösse vollführen; dass endlich ein Gleiches alle durch Anblasen zum Selbsttönen veranlassten, von solchen Orgelpfeifen und Blasinstrumenten umschlossenen Luftsäulen bewirken, die mittelst schwingender Lamellen, wie Metallzungen, Clarinettblätter, Oboë- und Fagottröhrchen,

oder mittelst Vibration der Lippen, wie bei Blechinstrumenten (Horn, Trompete, Posaune, Tuba u. s. w.) zum Tönen gebracht werden, — Alles dieses bedarf in der That ebensowenig eines Beweises, als dass die menschliche und thierische Stimme, schwingende Membranen, Platten, Ringe, Glocken u. dgl. in gleicher Weise Luftstösse ausüben.

Auch bei den Sirenen, die wir bisher kennen gelernt haben, ist die Schallerzeugung durch Luftstösse keinem Zweifel unterworfen, sei es, dass wir durch die Löcher einen Luftstrom treiben, der durch die folgenden Zwischenräume unterbrochen wird, oder, dass wir den Luftstrom durch ein in die Löcher schlagendes Kartenblatt ersetzen, und damit zu der, der Radsirene völlig analogen Erregungsart gelangen.

Ebenso sagt uns die einfache Ueberlegung, dass die Riefentöne unseres Bucheinbandes auf Stössen genau derselben Art beruhen, wie sie das vom Zahnrade getroffene oder in die Löcher der Sirenenscheibe einschlagende Kartenblatt erleidet.

Eine andere Art, mittelst einer Sirene Töne hervorzubringen, wollen wir jetzt kennen lernen. Es ist diejenige, durch welche der Apparat seinen mythologischen Namen erst eigentlich rechtfertigt. Bekanntlich waren die Sirenen der alten Welt weibliche Meergeschöpfe, die durch ihren Gesang die Schiffer so zu bezaubern wussten, dass sie an die Leitung ihrer Fahrzeuge vergassen, demzufolge diese an den Felsen der Scylla und Charybdis elendiglich zerschmetterten, und mit Mann und Maus in die Tiefe sanken. Ob auch der Gesang unserer Wassersirene so fascinirend klingt, mögen Sie selbst entscheiden.

Bevor wir jedoch den Versuch machen, muss ich Ihnen erst eine Erklärung dieses von Caignard de la Tour erfundenen, ursprünglich nur für einen Ton eingerichteten Apparates geben, auf dessen Principe sowohl die Dove'sche vierstimmige, als auch die acht-, beziehungsweise (in Hinblick auf deren Einklang) siebenstimmige Doppelsirene von Helmholtz beruhen, deren Bekanntschaft wir bei anderer Gelegenheit machen werden.

Ueber einer sogenannten Windtrommel (Fig. 108 *b*), in deren Decke eine Anzahl von Löchern in gleichen Abständen im Kreise angebracht sind, befindet sich eine genau in gleicher Weise mit Löchern versehene, um eine Axe leicht drehbare Scheibe (*c*). Diese Löcher werden während der Rotation zu gewissen Zeiten genau über

jenen der Trommel sich befinden und demnach dem Winde (oder in unserem Falle dem Wasser) den Durchgang gewähren, während die Scheibe in den anderen Stellungen die Communication nicht gestattet.

Was aber die Drehung der Scheibe automatisch bewirkt, ist die entgegengesetzt-schräge Bohrung der beiderseitigen Löcher, wie sich dies aus der Zeichnung (Fig. 109) vollkommen deutlich erkennen lässt. Mit zu- oder abnehmendem Drucke der Luft oder Flüssigkeit wird die Rotation und damit die Tonhöhe zu- oder abnehmen. Der stärkere Ton dieser Gattung von Sirenen gegen-



Fig. 108.

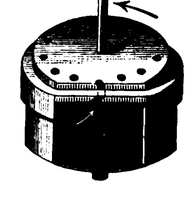


Fig. 109.

über den Scheibensirenen erklärt sich durch den Umstand, dass hier gleichzeitig durch alle Löcher die Impulse erfolgen und weiters auch — allerdings nur dann, wenn mit Luft operirt wird — die Resonanz des Trommelgehäuses mitwirkt, während bei der gewöhnlichen Scheibensirene der Luftstoss nur durch je eine Oeffnung stattfindet.

Lassen wir nun unsere Sirene ertönen. Sobald das Wasser [1]) durch die Schlauch- und Rohrleitung *a* in die Trommel *b* eintritt, beginnt die Rotation der Scheibe *c* und damit der Klang, der mit der zunehmenden Schnelligkeit der Umdrehungen, die von der Stärke

[1]) Wenn keine Wasserleitung mit hohem Drucke zur Verfügung steht, kann sich auch einer Handfeuerspritze bedient werden.

des Wasserdruckes abhängt, höher und lauter wird. Das die Sirene umgebende Glasgefäss *d* füllt sich allmälig mit Wasser, das ansteigend die Sirene bedeckt, die nun unter dem Wasser singt.

Dass unserer Sirene dasselbe klangerregende Princip periodischer Stösse zu Grunde liegt, wie allen übrigen Stossapparaten, wird Ihnen wohl nicht zweifelhaft sein. In dem einen — der Zahnradsirene — stossen feste Körper auf feste; in dem anderen — der Scheibensirene — luftförmige auf luftförmige; in dem dritten endlich — wie im vorliegenden Falle — tropfbar-flüssige auf tropfbar-flüssige. Die Stösse, welche die periodisch austretenden Wasserstrahlen auf die umgebende Wassermasse ausüben, werden von dieser an die Luft abgegeben und so unserem Ohre zugeführt.

Die Töne der Aeolsharfe, der Telegraphendrähte u. dgl. beruhen auf partialen Transversalschwingungen und gehören demnach in die zuerst aufgezählte Kategorie. Jene Töne, welche elektrische und magnetische Ströme, dann thermische Einflüsse in Drähten hervorrufen, sind zwar ihrer phonischen Natur nach noch wenig untersucht, dürften aber auf longitudinale, vielleicht auch mit transversalen Schwingungen complicirte Oscillationen, mithin in letzter Auflösung ebenfalls auf Luftstösse zurückzufüren sein. —

Dass das sogenannte Reibungsgeräusch, welches als ein Durcheinanderschwirren unzähliger Töne aufzufassen ist, in der Klangbildung eine wesentliche Rolle spielt, werden wir alsbald kennen lernen. Die Erklärung der Art und Weise aber, wie sich daraus die Primitivimpulse entwickeln, aus welchen die zur Klangbildung erforderliche Periodicität von Luftstössen entsteht, die als Ton unserem Gehöre sich mittheilen, ist bezüglich einiger hieher gehöriger Vorgänge um so schwieriger, als, wie man zu sagen pflegt, die Gelehrten selbst darüber noch nicht einig sind. Vornehmlich ist dies der Fall in Bezug auf die tönende Erregung von Luftsäulen mittels eines bandförmigen Luftstromes, wie solches beim Anblasen offener oder gedeckter Röhren, insbesondere von Flöten, dann von sogenannten Labial- oder Lippenpfeifen geschieht, zu welch' letzteren vor allem die Orgelpfeifen zählen; desgleichen alle Arten Signalpfeifen, von der Locomotivglockenpfeife bis zur Pfeife des Tramway-Kutschers, vom Lockrufe des Vogelstellers bis zum Pfeifchen, das der Hirtenknabe aus Schilfrohr oder Weidenrinde schnitzt.

An diesem zerlegbaren Modelle (Fig. 110) können Sie die typische Construction einer Labial-Orgelpfeife ersehen, und zwar den durch *b*, *c*, *d* gebildeten Pfeifenfuss, den Kern *b*, die Kernspalte *s*, die Labiumöffnung (Aufschnitt) *t* mit dem Unter- *d* und Oberlabium *a*, den Pfeifenkörper *f*. —

Die divergirenden Theorien über die Schallerregung in diesen, in der Musik eine so wichtige Rolle spielenden Tonwerkzeugen können an dieser Stelle nur kurz berührt werden, und muss die ausführliche Betrachtung einem späteren Zeitpunkte vorbehalten bleiben.

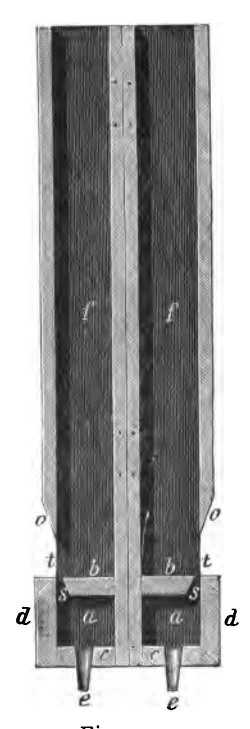


Fig. 110.

Nach der einen Theorie (Strouhal) ist es das Geschwirre eines aus enger Spalte hervorbrechenden, an der Kante einer Röhre brandenden Luftbandes[1]), das den Primitivimpuls dadurch veranlasst, dass die Röhre aus den unendlich vielen verschiedenen Schwingungszahlen jenes Luftgeschwirres diejenige auswählt, welche ihrem Eigentone entspricht, wodurch die Luftsäule der Röhre vermöge der Resonanz in stehende Schwingungen geräth, die, einmal gebildet, auf das Luftband zurückwirkend, es zwingen, diesen Schwingungen zu folgen und sich ihnen genau anzuschliessen.

Dieser Theorie, man könnte sie die der akustischen Erregung nennen, entgegengesetzt ist die von Sonreck aufgestellte Theorie, die die Erregung als rein mechanischen Vorgang auffasst. Nach ihm bewirkt der über die Oeffnung der Röhre wegsausende Luftstrom ein Ansichreissen der ihm zunächst befindlichen Lufttheilchen, wodurch eine vom Anblaseende der Röhre gegen deren Mitte fortschreitende Ver-

[1]) Man mache den Versuch, mittels eines an einem Ende flachgedrückten, eine schmale Spalte bildenden Messingröhrchens eine kurze Glasröhre in der Ebene ihres Randes sehr leise, dann immer stärker anzublasen, um sich zu überzeugen, dass das anfängliche Luftgeräusch allmälig in Klang übergeht.

dünnung entsteht. Die Folge derselben ist, dass die dichtere äussere Luft vom entgegengesetzten Ende der Röhre, wenn diese eine beiderseits offene ist, gegen die Mitte nachstürzt, gleichzeitig aber, vermöge des aus gleichem Grunde erlangten Uebergewichtes die bandförmige Luftzunge in das Innere der Röhre drückt und dadurch eine auch von dieser Seite gegen die Mitte der Röhre fortschreitende Verdichtung bewirkt. In Folge dieses Ausgleiches vermag das Luftband wieder in seine frühere Lage zurückzukehren und seine Saugarbeit vom neuen aufzunehmen.

Selbstverständlich kann bei sogenannten gedeckten, das ist nur einseitig offenen Röhren, der periodische Ausgleich der Luftzustände nur beim offenen Ende, also am Labium stattfinden.


Fig. 111.

Neige man sich nun dieser oder jener Theorie der Primitiverregung zu, so sind das Resultat stets stehende Schwingungen der Luftsäule. Der Ton des Brummkreisels lässt sich nach beiden Theorien erklären.[1])

Die Töne, welche entstehen, wenn man mit einer Schnur, mit einem Drahte oder Stabe die Luft rasch durchfährt, und die im eminenten Sinne zu den Reibungstönen gezählt werden müssen, lassen sich ebenfalls auf Luftstösse zurückführen, wie aus folgender Beobachtung hervorgeht. Nehmen wir an, der Stab (Fig. 112) werde rasch um den Punkt x im Kreise gedreht, und zwar in der Richtung des Pfeiles. Sobald sich nun der Stab von a nach b bewegt, so wird an der Stelle von a, die er soeben verliess, ein leerer Raum zurückbleiben, in welchen sich die umgebende und insbesondere die vor dem Stabe in Folge seines Vorrückens verdichtete Luft sofort stürzt und dadurch einen

[1]) Um die Tonbildung eines solchen Kreisels in allen Phasen bequem beobachten zu können, befestigt man denselben am Rande einer Scheibe derart, dass seine Oeffnung den äussersten Punkt des Radius bildet und somit den grössten Kreis beschreibt (Fig. 111), wenn die Scheibe mittels einer Schwungmaschine in Rotation versetzt wird. Sobald die Umdrehungen eine gewisse Geschwindigkeit erreichen, beginnt das Tönen des Kreisels. Die zuerst auftretenden leisen Töne sind die höheren, und dürften das Product von Geschwirre und Resonanz sein, wogegen die lauteren und tieferen zweifellos durch die Saugarbeit der Luft hervorgerufen werden.

Stoss übt. Ebenso leicht begreift es sich, dass dieselben Erschütterungen auch beim umgekehrten Vorgange, nämlich dann erfolgen müssen, wenn der Stab, anstatt dass er die Luft durchfurcht, unbewegt bleibt, hingegen bewegte Luft auf ihn zuströmt, sich vor ihm verdichtet, an ihm spaltet und hinter ihm durch Saugwirkung Verdünnungen erzeugt.

Es besteht hier genau derselbe Vorgang wie beim Hervorrufen explosiver Schalle, wie solche durch das schnelle Herausziehen des Fingers aus dem Fingerhut, das rasche Abziehen eines Pennaldeckels, beim Gewehr- oder Kanonenschusse, beim Schnalzen mit der Zunge oder mit der Peitsche, beim Blitzschlage u. s. w. entsteht. In allen diesen Fällen ist das rapide Hineinstürzen der umgebenden Luft in das entstandene Vacuum und die dadurch hervorgebrachte Lufterschütterung der Grund der Schallentstehung. Beim drehenden Stabe werden sich nun diese Vorgänge auf jedem Punkte, den der Stab soeben verliess, wiederholen und zwar um so häufiger, je rascher die Drehung erfolgt.

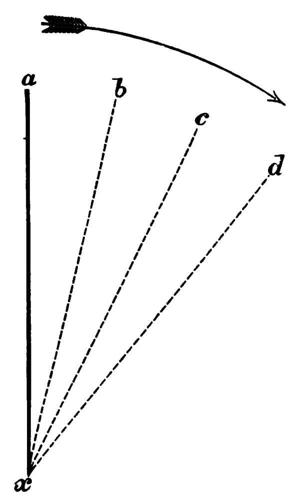


Fig. 112.

Dass diese Stösse auf den Stab rückwirken und ihn nöthigen, seine scheinbar continuirliche Drehung in eine ruckweise zu verwandeln, ergibt sich aus dem Vorgetragenen von selbst.

Ueberhaupt ist es die Wechselwirkung zwischen Reibung und Schallbildung, die sich überall dort geltend macht, wo es sich um continuirliche Erhaltung des erregten Tones handelt (im Gegensatze zu Schallerregungen durch Stoss oder Zerrung, denen die Abnahme der Intensität des Tones, das sogenannte Abklingen, nothwendig folgt).

Zu den musikalisch wichtigsten Ergebnissen dieser Wechselwirkung muss die Art gezählt werden, wie der Haarbogen Saiten, Stäbe, Platten in Vibrationen versetzt. Wenn man Haare vom Schweife des Pferdes, die bekanntlich zur Herstellung der Bögen für Streich-

instrumente unentbehrlich sind, durch ein starkes Mikroskop betrachtet [1]), so findet man, dass ein solches Haar einer förmlichen Säge gleicht, es ist gezahnt vom Anfang bis zum Ende.

Diese Zähne, die man, wenn man ein solches Haar zwischen zwei Fingern hindurchzieht, als Rauhigkeit zu fühlen vermag, dienen zunächst dazu, das Geigenharz aufzunehmen und festzuhalten; sie functioniren demnach in der Art, dass sie, unterstützt durch die Klebewirkung des Colophoniums, die Saite anfassen, um sie soweit aus ihrer Ruhelage zu ziehen, bis sie in Folge der vermehrten Spannung von selbst sich losreisst und zurückschnellt, um dann wieder von einer folgenden Haarzahngruppe gefasst zu werden.

Dass die Eigenschwingungen einer Saite, eines Stabes oder einer Platte mit diesem periodischen Anziehen und Loslassen sofort in Wechselwirkung treten, lässt sich leicht einsehen, aber auch experimentell aus dem Umstande erkennen, dass schwere, lange Saiten mit einem raschen Bogenstrich ebenso wenig in regelmässige Schwingungen versetzt werden können, als sich der Ton sehr kurzer Saiten, kleiner Stäbe, dann hohe Plattentöne durch langsames Streichen hervorrufen lassen, wie wir dies seinerzeit aus Versuchen erkennen werden.

Diese Wechselwirkung besteht gleichfalls bei der Erregung der Longitudinaltöne von Saiten, Stäben, Röhren, wie wir sie im vorigen Vortrage an verschiedenen Stoffen hervorbrachten, und auf die wir an betreffender Stelle näher eingehen werden. Insbesondere fusst die Anwendung der, in der Akustik so wichtigen, sogenannten Streichstäbchen auf der Rückwirkung der Schwingungen der damit erregten Schallquelle. Die wechselweise Spannung und Vorrückung der Hautwülste des streichenden Fingers setzen sich mit dem Rhythmus des durch diese periodischen Rückungen in Schwingungen gerathenden Körpers in Uebereinstimmung. [2])

---

[1]) Wird demonstrirt.

[2]) Streichstäbchen fertigt man sich selbst an, indem man ein dünnes Glasröhrchen an beiden Enden fasst, über eine Spiritus- oder Bunsenflamme hält und es, sobald es an der Erwärmungsstelle weich geworden, rasch auseinander zieht. Bei einiger Uebung kann man sie in beliebiger Länge und Dicke erzeugen. Man kittet sie in kleine Füsschen aus Kork oder Hollundermark, und versieht diese mit etwas Klebwachs, um sie an dem betreffenden Körper befestigen zu können. Ihre Längen können zwischen 8 und 15 Centimeter variiren. Nach einigen Versuchen wird man leicht die für den betreffenden Zweck dienlichste Länge und Dicke ermitteln.

Einige Proben, die ich Ihnen jetzt vorführen will, werden Sie die Wichtigkeit dieses kleinen Dinges erkennen lassen, ohne welches man, beispielsweise, nicht im Stande wäre, flächenförmige Körper central in Schwingung zu versetzen. Wichtigere Anwendungen des Streichstäbchens werden wir in der Folge kennen lernen.

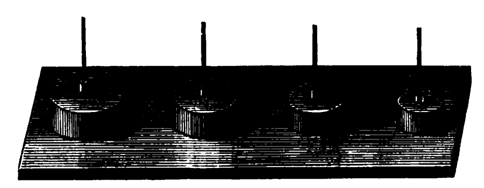


Fig. 113.

Der Beweis, dass mit diesen vier, nach den Schwingungszahlen eines Dur-Dreiklanges gewählten, auf weichen Unterlagen ruhenden Cartonschachteln (Fig. 113) der Accord in seinen Grund-, wie in den nächsten Obertönen hervorgerufen werden kann, dürfte ohne Hilfe des Streichstäbchens kaum zu führen sein. Ebenso wenig wäre es

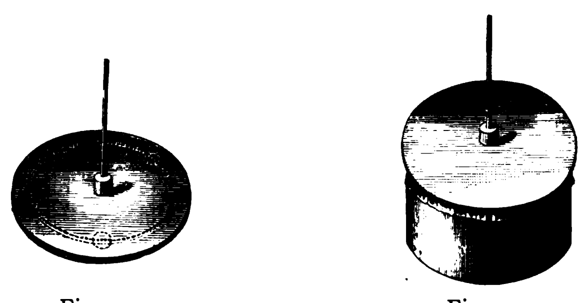


Fig. 114. Fig. 115.

möglich, eine auf Filzfüsschen ruhende Glas- (oder Metall- oder Holz-) scheibe (Fig. 114) von ihrem Mittelpunkte aus, oder auch entfernter davon, zum Tönen zu bringen und die dem Klange entsprechende Sandfigur hervorzurufen. In gleicher Weise verhält es sich mit gespannten Membranen (Fig. 115). — Glocken, Stimmgabeln (Stäbe überhaupt) lassen sich mit Streichstäbchen ebenfalls leicht zum Tönen bringen (Fig. 116 und 117). Chladny's »Euphon«, von welchem seinerzeit die Rede sein wird, beruht gleichfalls auf dieser Erregungsart, und ebenso die Hervorrufung des Klanges von Gläsern,

Glasschalen und Glasglocken, die übrigens auch durch Reiben ihres Randes mit benetzten Fingern (wie bei der sogenannten Glas-harmonika), oder durch Bogenstrich zum Tönen gebracht werden können.



Fig. 116.

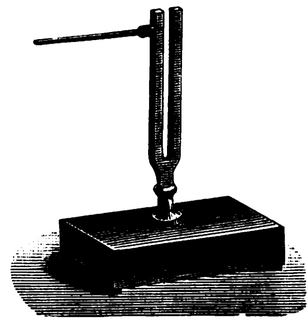


Fig. 117.

Die, ein bestimmtes Gesetz befolgenden, wenn auch schrillen Töne, die man runden Stäben und Röhren durch drehende Reibung mit beharztem Leder entlockt (die sogenannten Torsionstöne, auf

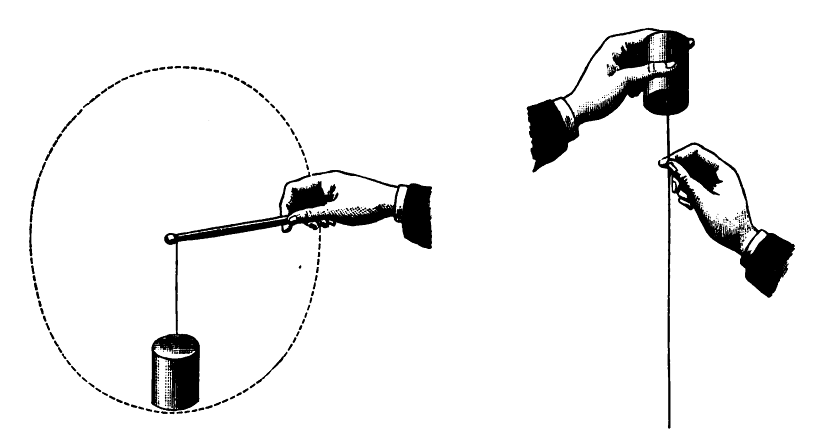


Fig. 118. Fig. 119.

welche wir seinerzeit zurückkommen werden), erklären sich ebenso wie die minder angenehmen, mehr dem Geräusche sich nähernden Töne, welche ungeschmierte Maschinen, verrostete Thürangeln, mittelst geriebener Pferdehaare in Vibration versetzte gespannte Membranen

u. dgl. hören lassen, durch das wechselweise Packen und Losreissen der reibenden Flächen.

Hier einige Proben von derartigen Klängen und zwar hervorgebracht:

1. Durch eine mit einem Pferdehaare verbundene, über einen kleinen Cylinder gespannte Membrane, die man an einer am Ende des Haares gebildeten Schlinge, mittelst eines runden Stäbchens im Kreise schwingt (Fig. 118), oder durch Reibung des Haares mit beharzten Fingern in Vibration versetzt (Fig. 119).

2. Durch ein Messingrohr, dem man mittelst drehender Reibung mit beharzten Fingern den Torsionston entlockt (Fig. 120).

Aus allen diesen Beispielen, welche zeigen, ein wie ausgedehntes Gebiet in der Schallerregung die Reibung einnimmt, ergibt sich der Satz, dass jeder Reibung Periodicität zu Grunde liegt.

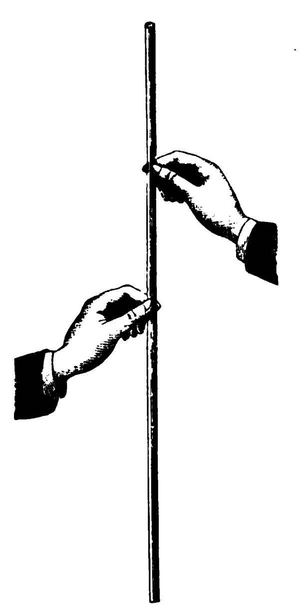


Fig. 120.

---

15. Vortrag.

(Reibungstöne. — Ausflusstöne. — Tönende Flammen.)

Aus den am Schlusse des vorigen Vortrages demonstrirten Vorgängen dürfte als erwiesen die Folgerung gezogen werden, dass jede Reibung auf Periodicität beruht.

Diese aus der Erfahrung geschöpfte, durch die mannigfaltigsten Untersuchungen bestätigte Thatsache erklärt manche Erscheinungen, über deren Ursache man vordem ungewiss war. Hierher gehört das Geheul eines durch Schlüssellöcher, Schlotte, Mauerritzen dringenden Sturmwindes, ferner das Pfeifen mit den Lippen, dann jene Töne, welche entstehen, wenn ein Luftstrahl, durch eine kleine Oeffnung

einer dünnen Fläche getrieben, gegen eine in bestimmter Entfernung befindliche ähnliche Oeffnung, oder gegen eine Schneide strömt.

Mittelst zweier in Form einer Linse (Fig. 121 *a*) aneinander gelötheten, in der Mitte durchbohrten convexen Blechblättchen, dem bekannten Vogelruf (Fig. 121 *b*), kann man noch stärkere Töne dieser Art, und zwar in einem Umfange von nahezu drei Octaven hervorbringen. Schwache Töne ähnlicher Art entstehen, wenn man mit gespitztem Munde sehr leise gegen eine Messerschneide oder ein Kartenblatt bläst. Ein durch blos eine Oeffnung getriebener Luftstrahl erzeugt ebenfalls Töne, wenn die durchbohrte Platte nicht zu dünn ist, mit einer Röhre verbunden wird, und die Oeffnung scharfe Ränder hat.

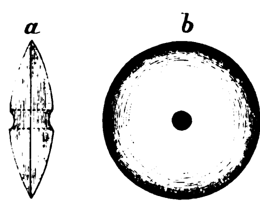


Fig. 121.

Insbesondere aber gehören hierher die von Savart entdeckten geheimnissvollen Töne, die ein aus einer Röhre durch eine Platte mit enger Oeffnung fliessender Wasserstrahl hervorbringt (Fig. 122).


Fig. 122.

Wenn wir den Ausfluss plötzlich hemmen und die in diesem Momente wahrgenommene Tonhöhe mit jener des entleerten Theiles der Röhre vergleichen, so zeigt sich vollkommene Uebereinstimmung, was beweist, dass man es hier mit dem Eigentone der jeweiligen Rohrlänge zu thun hat, der durch das Ausfliessen des Wassers geweckt wird. Dieses Ausfliessen kann demnach nur ein discontinuirlicher Vorgang sein, weil nur ein solcher Stösse hervorbringen kann, um die es sich hier offenbar handelt.

Es entsteht nun die Frage, ob diese Stösse durch die Reibung des Wassers an den Rändern der Ausflussöffnung entstehen, von wo sie sich auf die Wassersäule fortpflanzen, und die Luftsäule der Röhre zum Tönen bringen, indem sie sich ihrer Schwingungszahl anpassen.

Auch entsteht weiters die Frage, ob für die Annahme, dass das Ausfliessen kein continuirlicher, sondern ein intermittirender Vorgang ist, die bekannte Erscheinung, dass der ausfliessende Strahl schon in geringer Entfernung von der Ausflussstelle seinen Zusammenhang verliert, und sich in eine Reihe von Tropfen auflöst, als Beweis angesehen werden kann. Diese beiden Fragen gehören heute noch zu den controversen.

Sicherlich wirkt bei der Abtrennung der einzelnen Tropfen die Beschleunigung des freien Falles mit, indem der ausfliessende Strahl in seinen verschiedenen Theilen offenbar verschiedene Fallgeschwindigkeiten haben wird, der Zusammenhang des Strahles also nothwendig gestört werden muss.

Wird nun angenommen, dass das, bei diesen Abtrennungen stattfindende, an jedem sogenannten Tropffläschchen deutlich wahrzunehmende Zurückschwingen des um das Gewicht des abgetrennten Tropfens erleichterten Strahles einen Rückstoss auf die ganze darüber befindliche Wassermasse, und durch diese auf den Resonanzraum der Röhre ausübt, so ist wohl der Schluss nicht abzuweisen, dass die Wirkung dieses Bestrebens, sich zu trennen, auch schon im homogenen Theile des Strahles zur Geltung gelangen und sonach ähnliche pulsorische Bewegungen zur Folge haben dürfte. —

Von den Tönen, die manche Insecten (Grillen, Heuschrecken) durch Reibung bestimmter Körpertheile, andere, wie Bienen, Fliegen u. s. w., durch ihren Flügelschlag hervorbringen (auch kleine Vögel, so Kolibris, haben einen tönenden Flug), soll hier nur der Vollständigkeit wegen Erwähnung geschehen, wozu allerdings bemerkt werden muss, dass letztere Erscheinung nicht auf Reibung, sondern auf unmittelbaren Luftstössen beruht. Aus der Tonhöhe die Zahl der Flügelschläge zu bestimmen, — bietet, sobald wir die Schwingungszahl des Tones kennen, keine Schwierigkeit. (Eine Hornisse, wenn sie ruhig schwebt, lässt das Fis_0, beim Niederlassen aber das F_0 hören; sie macht also im ersten Falle 366, im letzteren 345 Flügelschläge.)

Eine besondere Art Klangerregung, an deren nähere Betrachtung wir jetzt gehen wollen, ist die, eine Luftsäule durch eine Flamme ertönen zu machen. Wiewohl zur Verwendung in der praktischen Musik nicht geeignet, gehören die sogenannten singenden Flammen doch zu den interessantesten Erscheinungen der Akustik und bilden

ein noch immer nicht vollständig aufgehelltes Gebiet für die Forschung. — Die Erscheinung selbst hervorzurufen, bietet keinerlei Schwierigkeit.

Man entzündet ein brennbares, aus einem gespitzten Röhrchen strömendes Gas — am bequemsten das gewöhnliche Leuchtgas — und stülpt eine Röhre darüber (Fig. 123), welche, um die dabei auftretenden Erscheinungen auch mit dem Auge verfolgen zu können, aus Glas gewählt wird, aber auch aus jedem beliebigen anderen Stoffe bestehen kann, wie wir uns sofort überzeugen können, wenn wir die Glasröhre durch Röhren aus Messing, Pappe und Holz ersetzen. Haben die Flamme und die Röhre richtige Verhältnisse zu einander, so wird man bald den Punkt finden, bis wohin die Röhre über die Flamme geschoben werden muss, damit sie zu tönen beginnt.

Constatiren wir zunächst, bevor wir mit unserer Röhre experimentiren, die Höhe ihres Eigentones, indem wir die Röhre durch Anblasen zum Tönen bringen.

Man überzeugt sich leicht, dass die mittelst der Flamme zum Tönen gebrachten Röhren nicht nur nahezu genau den für die offenen Pfeifen geltenden Gesetzen folgen, sondern, dass sich der Vorgang der Tonerregung ebenfalls dem der Pfeifen anschliesst.

Wiewohl auf beide Punkte ausführlicher erst in dem, von den Pfeifen handelnden Abschnitte eingegangen werden kann, so soll hier dennoch andeutungsweise Einiges darüber vorgebracht werden.

Wir nehmen zunächst wahr, dass der Ton — analog dem Pfeifentone — so lang andauert, als das Erregungsmittel — dort der bandförmige Luftstrahl, hier die Flamme — anhält. Wir finden, dass der Ton höher wird, wenn wir die Flamme vergrössern, weil wir dadurch eine Wärmezunahme bewirken, welche bekanntlich in jeder tönenden Luftsäule eine Steigerung der Tonhöhe hervorruft. Zugleich vermehrt die vergrösserte Flamme die Intensität der Impulse. Der Ton wird lauter, gleich wie bei der Pfeife, wenn man den Winddruck verstärkt.

Die Erhöhung und Vertiefung des Tones durch Verkürzung oder Verlängerung der Röhre erfolgt ebenfalls wie bei der Windpfeife. Es lassen sich, wie bei Pfeifen, Obertöne darstellen, endlich ist es, wie dort, möglich, in einer Röhre zwei, und unter günstigen Umständen auch mehr Töne gleichzeitig hervorzurufen, wie dies aus

den Versuchen hervorgehen wird, welche wir diesfalls später anstellen wollen.

Wenn wir die Flamme betrachten, bevor und nachdem die Röhre zu tönen begonnen hat, so sehen wir die vordem ruhig brennende Flamme mit Beginn des Tönens sich verlängern und merklich an Leuchtkraft einbüssen. Fixiren wir die tönende Flamme mit dem Blicke und vollführen mit dem Kopfe eine rasche Wendung nach rechts oder links, so löst sie sich in eine Reihe von Zacken auf. Deutlicher noch zeigt sich diese Erscheinung in einem, um eine

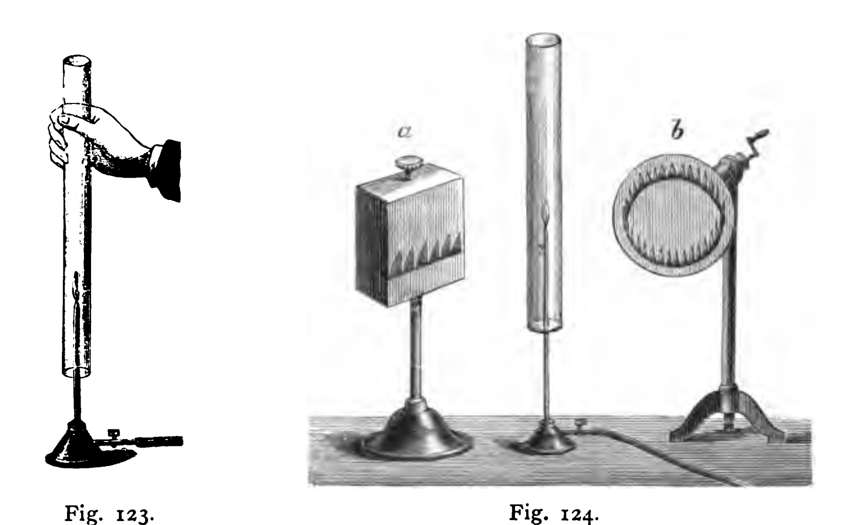


Fig. 123. Fig. 124.

verticale Axe rasche Drehungen vollführenden, aus Spiegelflächen gebildeten Würfel *a* (Fig. 124), oder in einer runden, an eine horizontale Axe etwas schief befestigten, vertical rotirenden Spiegelscheibe *b*.

Je schneller die Rotationen, um so besser trennen sich die einzelnen zahnartigen Flammenbilder, die, durch den kubischen Spiegel betrachtet, in schräger Lage und zwar in, der Axendrehung entgegengesetzter Richtung erscheinen, während sie im runden Spiegel, im Kreise geordnet, sich dem Auge darstellen. Im nicht tönenden Zustande erscheint die Flamme im rotirenden kubischen Spiegel als horizontales, im runden als kreisförmiges Band.

Lassen wir zwei Röhren gleichzeitig ertönen und geben wir ihnen eine Stellung, dass sie im Spiegel übereinander brennend erscheinen (Fig. 125), so werden wir aus dem Verhältnisse der Zahl der Zähne mit Sicherheit das Intervall der beiden Töne mit dem Auge bestimmen können, denn, bildet das Intervall beispielsweise eine Octave, so werden in dem Flammenbilde der höheren Töne genau noch einmal so viel Zähne zu sehen sein, als in jenem des tieferen.



Fig. 125.

Beim Intervall der Quinte werden auf zwei Zähne des tieferen drei Zähne des höheren Tones entfallen.

Wir wollen beide Experimente ausführen, und damit für heute schliessen.

---

16. Vortrag.

(Tönende Flammen. Fortsetzung.)

Setzen wir unsere Untersuchungen über die tönenden Flammen fort. Wie auf einer Saite oder mit einer Pfeife, kann man, wie schon erwähnt, auch in einer mittelst der Flamme ertönenden Röhre die sogenannten Obertöne hervorrufen und zwar um so mehrere und um so leichter, je enger und länger die Röhre ist. Wir wollen diesen Versuch mit den beiden nächsten Obertönen, nämlich der Octave und Duodecime des Grundtones unserer Röhre anstellen. Wir werden hiebei auf eine weitere, für die Akustik hochbedeutsame Erscheinung stossen: auf die Coëxistenz mehrerer Töne in einem und demselben klingenden Körper.

Die Wichtigkeit dieser Erscheinung näher zu erörtern, auf welche sich vorzugsweise dasjenige gründet, was wir mit Klang-

farbe (timbre) bezeichnen, wird einen Gegenstand späterer, eingehender Betrachtung bilden.

Hier soll der Spiegel Sie blos das Thatsächliche der Erscheinung selbst erkennen lassen. Sie werden, wenn wir durch verschiedene Grösse und Stellung der Flammen im Klangrohre bald den Grundton, bald die Octave hervorrufen, das zuvor geschilderte Zahlenverhältniss der Zähne bemerken.

Wenn aber der tiefere Ton auf dem Punkte ist, in den höheren überzugehen, so wird das Flammenbild deutlich den Kampf ersehen lassen, den beide Töne, beziehungsweise deren Zacken miteinander führen; denn bald werden, je nachdem die eine Schwingungsart augenblicklich die Oberhand gewinnt, die Zacken des Grundtones, bald in doppelter Zahl jene des Obertones, oder aber auch beide gemischt im Flammenbilde zu erkennen sein (Fig. 126).



Fig. 126.

Wenn wir endlich Grösse und Stellung der Flamme richtig treffen, so werden wir nebst dem Grundtone zugleich mehrere Obertöne hervorrufen können, deren Reihe sich mittels Resonatoren verfolgen lässt.[1])

Da man den Ton der Röhren durch deren Verlängerung oder Verkürzung mittels Schieber (Fig. 127) genau stimmen kann, so lassen sich mit den Flammentönen alle jene Versuche ausführen, zu welchen Pfeifen sich eignen. Man kann mit einer Flammenröhre

---

[1]) Wesentliche Bedingung des leichten Gelingens dieser Versuchsreihe ist: *a*) enge und lange Röhre, und *b*) dünner, langer Brenner mit sehr kleiner Ausströmungsöffnung. Bei einiger Uebung lassen sich hervorrufen:

1. Octave allein (2).
2. Grundton und Duodecime (1 und 3).
3. Oberton 3 allein (Duodecime).
4. Obertöne 1. 2. 3. 4. 5.

und mit Stimmgabeln (oder Pfeifen, Sirenen u. dgl.) oder mit zwei Flammenröhren Schwebungen und andere Interferenzerscheinungen hervorrufen, wie sich denn überhaupt diese Tonkörper zu mannigfaltigen Experimenten eignen [1]), von welchen wir aber hier nur noch einige der interessanteren ausführen wollen, und zwar folgende:

1. Schwebungen zwischen dem Rohrtone und dem Tone einer gleichgestimmten, schwach angeschlagenen, mit Klangkästchen versehenen Gabel (Fig. 128), sobald der Einklang gestört wird.



Fig. 127.

2. Schwebung des gestörten Einklanges zweier Flammenröhren.

3. Schwebungen der Quinte mittels zweier Röhren.

4. Schwebungen der Octave in gleicher Weise.

5. Resonanzerscheinung:

Weckung des Tones einer mit Klangkästchen versehenen Gabel durch den Einklang des Rohrtones (Fig. 129). Die Vibrationen der Gabel verrathen sich durch Schwebungen bei Verstimmung des Rohrtones mittels des Schiebers, oder durch Nahebringen eines beliebigen Gegenstandes an eines der Enden der Flammenröhre.

6. Versuch, die, in einer zum freiwilligen Ertönen nicht geeigneten Stellung befindliche Flamme, durch den Ton einer Gabel, Pfeife, Sirene oder der Stimme (gleichsam auf Commando) zum Tönen zu bringen.

---

[1]) Auch Combinationstöne, die wir später kennen lernen werden, lassen sich durch Flammenröhren darstellen.

7. Interferenzerscheinungen bewirkt: *a*) durch den Ton einer stark angeschlagenen, freien, dem unteren oder oberen Rohr-

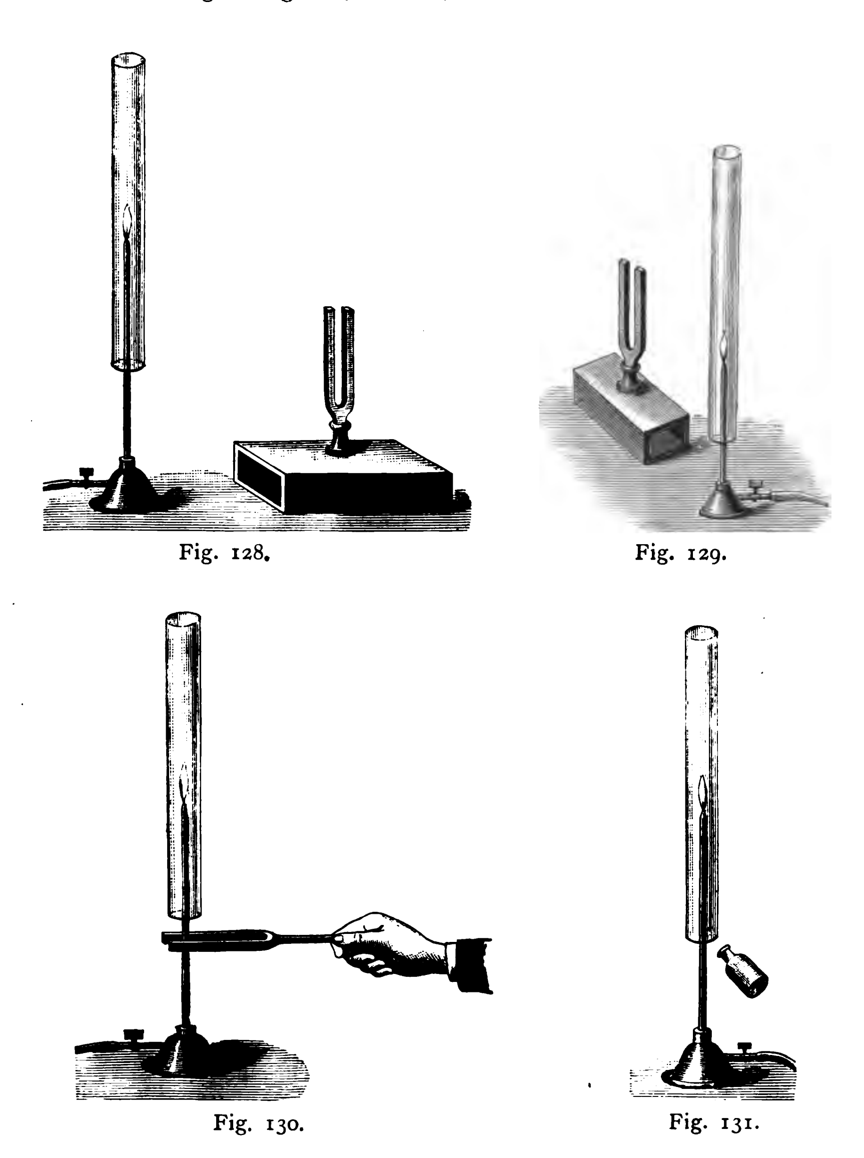


Fig. 128. Fig. 129.

Fig. 130. Fig. 131.

ende genäherten Unisono-Stimmgabel (Fig. 130); desgleichen *b*) mittels eines gleichgestimmten Fläschchens (Fig. 131). Letzteres Experiment

ergibt eine absolute Interferenz, nämlich ein vollkommenes Verschwinden des Flammentones; ersteres nur eine Schwächung desselben. Alterirt man den Ton des Fläschchens durch Näherung irgend eines Gegenstandes an dessen Mündung nur im Geringsten, so wird die Interferenzwirkung aufgehoben und der Flammenton erscheint sofort wieder.

8. Experimentalbeitrag, welcher die alsbald zu betrachtende Zoch'sche Hypothese zu bestätigen scheint, indem die Flamme bei Vergrösserung derselben über ein gewisses, der Rohrlänge proportionales Maass plötzlich verlischt. Dass die in Folge der Vergrösserung der Flamme gesteigerte Erwärmung der Rohrluft und dadurch vermehrte Heftigkeit des aufsteigenden Luftstromes das Ausblasen der Flamme um so leichter bewirkt, wenn diese in Folge der Ansaugung durch die verdünnte Rohrluft mehr Gas benöthigt, als ihr im Brennerröhrchen nachzurücken vermag, ist wohl selbstverständlich. —

Lassen Sie uns jetzt noch die Frage: wie man sich den bei der Tonerregung durch die Flamme stattfindenden physikalischen Vorgang vorzustellen habe, einer kurzen Erörterung unterziehen.

Ueber diesen Vorgang bestehen mehrere Hypothesen.

Savart nimmt an, dass der durch die Erwärmung im Rohre entstehende Luftzug der Flamme eine solche Menge Sauerstoffes zuführt, welche Bildung von Knallgas und dadurch Explosionen bewirkt, deren jede die Flamme verkleinert, was eine Abkühlung und dadurch eine Verminderung des Luftzuges zur Folge hat, worauf das Spiel von Neuem beginnt. Dieses Knister-(Crepitations-)Geräusch regt den Eigenton des Rohres an und die dadurch eingeleiteten Schwingungen der Luftsäule bestimmen das Tempo der Explosionen.

Tyndal glaubt, dass durch diese Explosionen die Flamme völlig verlischt, jedoch von der remanenten Wärme wieder entzündet wird.

Nach einer von Zoch aufgestellten Theorie verursacht der durch die Erwärmung entstehende Luftzug rasche Ansaugungen, mithin Verlängerungen der Flamme. Diese Ansaugungen, welche, wenn sie im Verhältnisse zum Nachschube des Gases zu heftig werden, das Verlöschen der Flamme, wie dies vorhin gezeigt wurde, bewirken können, entnehmen dem Ausströmungsrohre mehr Gas, als durch den

Druck nachrücken kann, und es entsteht, während der oberste Theil des Gases verbrennt, dahinter eine Verdünnung; die Flamme wird kleiner. Sobald das Gas wieder nachströmt, erneuert sich der Vorgang. Die Verlängerung und Verkürzung der Flamme erzeugt die Stösse, deren Periodicität durch die Wellenlänge des Rohrtones (Grund- oder Obertones) geregelt wird.

Grailich und Weiss sind der Meinung, dass die Unruhe, welche der in Folge der Verbrennung des Sauerstoffes entstehende Luftzug verursacht, ein Schwirren der Flamme und dieses unter Mitwirkung der Resonanz die periodischen Schwingungen der Luftsäule einleite und unterhalte. — Wieder einer anderen Ansicht zufolge findet ein, der Sonreck'schen Pfeifentheorie analoger Vorgang statt. Hiernach entsteht durch die Hitze der Flamme um dieselbe eine Verdünnung, die so lange zunimmt, bis die äussere Luft das Uebergewicht erlangt, vermöge desselben in die Röhre stürzt, und da eine Verdichtung erzeugt, welche die Gasausströmung hemmt. Dadurch wird eine Verkleinerung der Flamme, folglich eine Verminderung der Wärme und somit der ursprüngliche Zustand wieder herbeigeführt, worauf der Vorgang von Neuem beginnt.

Welcher dieser Hypothesen nun man immer sich zuneigt, so bleibt die Resonanz des Rohrtones doch stets das Bestimmende für die Schwingungszahl und damit für die Tonhöhe. Die Primitivimpulse, gleichviel, wie man sich ihre Entstehung denken mag, sind die Erreger der Resonanz, und diese, rückwirkend, wird zum Regulator der durch sie eingeleiteten und unterhaltenen Schwingungen, möge das Erregungsmoment in sofort eintretenden Verdünnungen und Verdichtungen zu suchen sein, oder in jenem, alle Tonhöhen in sich vereinigenden Geschwirre, aus welchen sich die Röhre die ihr angemessenen Schwingungszahlen heraushebt.

17. Vortrag.

(Rijke's Versuch. — Pinaud-Röhren. — Lichtsirene.)

So wenig es unser Zweck sein kann, allen Erscheinungen nachzugehen, welche sich mit den Flammenröhren erzielen lassen, so wird

es auch, was andere Tonerregungen durch Flammen selbst, oder durch deren calorische Wirkungen betrifft, genügen müssen, hier nur von einigen derselben Act zu nehmen und die Wissbegierde der für Weiteres sich Interessirenden auf das Studium einschlägiger Specialarbeiten zu verweisen.

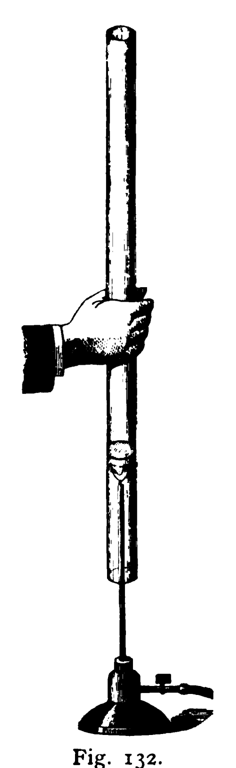


Fig. 132.

Zu den belehrendsten Phänomenen dieser Kategorie zählt vor Allem der sogenannte Rijke-sche Versuch, der darin besteht, dass man in ein Glasrohr (ungefähr bis zum Viertheil seiner Länge) ein Drahtnetz einführt und dieses mittelst einer Flamme rothglühend macht (Fig. 132). Entfernt man in diesem Momente die Flamme, so wird nach einer kurzen Pause das Rohr ziemlich kräftig in seinem Grundtone erklingen.

Dieser Versuch ist insofern von wissenschaftlichem Belange, als er den directen Beweis des hervorragenden Antheiles liefert, welchen der durch die Wärme bedingte aufsteigende Luftstrom an der Hervorrufung des Tones nimmt; denn, bringt man das Rohr, nachdem es zu klingen angefangen, in die wagrechte Lage (Fig. 133), so hört der Klang sofort auf, erscheint aber wieder, wenn man es in die verticale Lage zurückbringt.

Diese Art von Tönen lässt sich auch mit jedem Cylinder eines Auer'schen Gasbrenners hervorrufen, wenn man den Brenner sammt Cylinder 2—3 Centimeter höher hält. Der

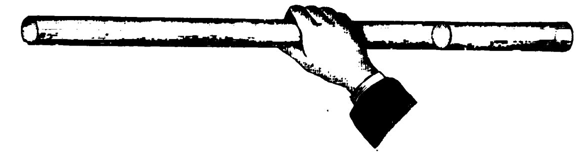


Fig. 133.

Ton ist sehr laut, gleichsam heulend. Noch schriller tönt ein, über ein, mittelst des Bunsenbrenners glühend gemachtes Drahtnetz gehaltener und mit dem Drahtnetze zu einer bestimmten Höhe gehobener

Lampencylinder. Einen solchen heulenden Ton lässt auch die Rijke-sche Röhre in dem Momente, als die Flamme das Drahtnetz berührt, vernehmen. Er ist viel höher, als der spätere, durch das glühend gewordene Netz entstehende.

Aus gleichen Vorgängen, nämlich aus, durch thermische Differenzen entstehenden Luftströmungen erklären sich die Töne, die in der Fingalsgrotte der schottischen Basaltinsel Staffa zu gewissen Zeiten vernommen werden, sowie jene, die ehedem die, zu den Ruinen von Theben in Oberägypten zählende Memnonssäule beim Sonnenaufgange hören liess. Heute klingt Memnon nur noch aus Schuberts gleichnamigem, wunderschönem Liede, und wer nicht eine Reise nach den Hebriden machen kann, muss sich mit der auch nicht üblen Ouverture Mendelsohn's begnügen.

Auch ein enges Glasrohr, an dessen einem Ende eine Glaskugel angeblasen ist (Fig. 134), ertönt, sobald man die Kugel erhitzt.[1]) Die Tonhöhe hängt hauptsächlich von der Länge, nebenbei auch von der Weite des Rohres, wie auch von der Grösse der Kugel ab.



Fig. 134.

Der Ton selbst ist nur nahe der Röhre vernehmbar und im Verhältnisse zur Kürze und Enge der Röhre von überraschender Tiefe.

Zweifellos entstehen diese, vom Physiker Pinaud entdeckten geisterhaften Töne auf dieselbe Weise, wie die zuvor entwickelte Sonreck'sche Theorie sie annimmt, nämlich durch die in der Röhre stattfindenden periodischen Zusammenstösse der aus derselben hervorbrechenden dünneren, weil erwärmten Luft, mit der diese Vorstösse zurückdrängenden dichteren Aussenluft. —

Sämmtliche Tonquellen, die wir zuletzt kennen lernten, haben zum Erreger die Wärme. Das Entstehen ihres Klanges beruht auf periodischen Störungen und Wiederherstellungen des Gleichgewichtes zwischen warmer und kalter Luft, die im Wechsel von Verdichtungen

[1]) Sobald die, die (zu drehende) Kugel umspielende Flamme gelb zu erscheinen beginnt, ist der Moment gekommen, das offene Rohrende ans Ohr zu führen. Die beiläufigen Masse sind: Durchmesser der Kugel: 4 Centimeter; ausgezogener (engerer) Rohrtheil: Länge 4 Centimeter, Lichte 3 Millimeter; weiter Rohrtheil: Länge 20 Centimeter, Lichte 6 Millimeter.

und Verdünnungen — (bekanntlich die Grundbedingung aller Klangbildung) — sich vollziehen.

Sind wir aber auch im Stande, uns über den Grund solcher Erscheinungen Rechenschaft zu geben, so überraschen sie gleichwohl durch das Ungewohnte ihres Zustandekommens, und dies in um so höherem Grade, je mehr der erregenden Substanz jene stofflichen Eigenschaften mangeln, die zunächst berufen sind, motorische Impulse zu bewirken. Dieses ist unter allen bisher bekannten Materien im weitest gehenden Masse beim Lichte der Fall, welches mit der Wärme, dem Magnetismus und der Elektricität die Gruppe der dem Gesetze der Schwerkraft nicht unterliegenden, sogenannten unwägbaren Stoffe bildet, in welcher Gruppe es vermöge der Schnelligkeit seiner Fortpflanzung die erste Stelle einnimmt.

Das Licht besteht, der heute herrschenden Hypothese zufolge, bekanntlich in Schwingungen des sogenannten Aethers, eines Stoffes, von dem angenommen wird, dass er das Universum erfüllt, von vollkommener Elasticität und von einer Feinheit ist, die ihm gestattet, in einer Secunde 1000 und mehr Billionen Schwingungen zu vollführen. Selbstverständlich kann eine solche Schwingungszahl nur mit dem Gesichtssinne wahrgenommen werden, denn der Gehörsinn ist bei ungefähr 40.000 Schwingungen an der Grenze seiner Receptionsfähigkeit angelangt, wiewohl diese Impulse Stösse eines im Vergleiche mit der Feinheit des Lichtäthers unendlich materielleren, weil grösserer mechanischer Kraftäusserungen fähigen Stoffes, nämlich der atmosphärischen Luft, sind. (Ich erinnere nur an deren Comprimirbarkeit, an den Druck, den sie auf evacuirte Gefässe, wie auf die Quecksilbersäule des Barometers übt, an die zerstörende Gewalt der Stürme u. s. w.)

Die Schwingungen des Lichtäthers als solche werden wir also niemals hören können, wohl aber periodische Einwirkungen von Lichtstrahlen.

Wenn wir nämlich einen Stoff von solcher Beschaffenheit, beziehungsweise Eigenschaft, dass durch abwechselnde Beleuchtung und Lichtentziehung in ihm moleculäre Bewegungen von beliebiger Schnelligkeit und Dauer hervorgerufen und unterhalten werden können, einer periodisch intermittirenden Beleuchtung aussetzen, so werden nothwendig Stösse auf die umgebende Luft erfolgen, was — wie wir wissen — Schallentstehung zur Folge haben muss.

Es ist also hier der Lichtstrahl selbst ebenso wenig, wie in den früher betrachteten Fällen die Wärme, das *tönende Princip*; sie sind blos das *Erregende*, denn das *Tönende* ist und bleibt immer nur der unser Ohr betreffende Luftstoss.

Als die zweckmässigste Vorrichtung, um einen solchen, die tönenden Impulse vollführenden Körper *intermittirend* zu *beleuchten*, empfiehlt sich die der *Scheibensirene* (Fig. 135). Man könnte auch schwingende Stäbe dazu verwenden. Allein diesen würden ebenso, wie der Anwendung einer *durchlöcherten* Sirenenscheibe der Uebelstand anhaften, dass sie die Erscheinung nicht in voller Reinheit zur Darstellung gelangen lassen, indem Stäbe selbst schon directe

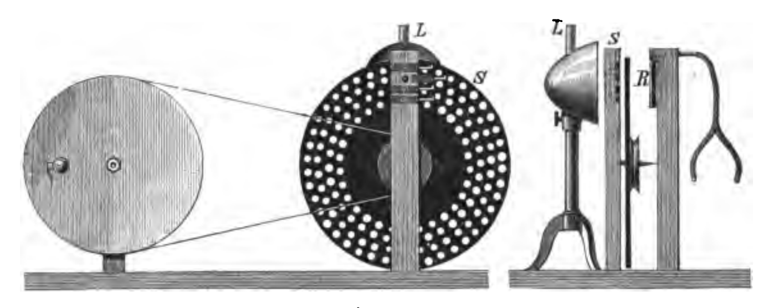


Fig. 135.

Luftstösse vollführen, die Löcher einer rotirenden Scheibe aber Reibungsgeräusche in der Art eines Kreisels hervorrufen.

Man wählt daher für die Scheibe unserer *Lichtsirene* (S) (wie ich sie nennen möchte) Glas, und stellt die, die Lichtstrahlen durchlassenden Oeffnungen dadurch her, dass man diese in schwarzem Papier ausschneidet, und mit diesem die Glasscheibe überklebt. Die Anordnung der Tonverhältnisse kann eine beliebige sein. In unserer Scheibe befinden sich *vier* concentrische Reihen solcher Oeffnungen, die den Schwingungszahlen des vierstimmigen Dur-Dreiklanges zu 4 5, 6 und 8 entsprechen.

Auf der, der Lichtquelle entgegengesetzten Seite der Scheibe, die durch einen Schnurlauf in beliebig schnelle Rotationen versetzt werden kann, befindet sich ein, mit dem Ohre communicirendes, einseitig geschlossenes *Glasröhrchen* (R), in welches man eine mit Lampenruss geschwärzte, dünne *Lamelle* aus Messing (auch Glimmer oder Hartgummi) einführt.

Bekanntlich saugt die schwarze Farbe Licht- und Wärmestrahlen gierig ein, während sie von der weissen zurückgeworfen werden. Man trägt deshalb im Sommer lichte Kleidung und folgt damit dem Beispiele der Bewohner heisser Länder.

Versetzt man die Scheibe in Umdrehung, so wird die im Röhrchen eingeschlossene berusste Lamelle von den Lichtstrahlen getroffen, wenn sich die Oeffnung in der Scheibe genau zwischen dem Röhrchen und der Lichtquelle befindet, welche letztere in einem gewöhnlichen Argand-Gasbrenner (L) bestehen kann (falls man elektrisches oder Kalklicht nicht zur Verfügung hat); die Lichtwirkung auf das Röhrchen wird aber unterbrochen, sobald der zwischen zwei Oeffnungen befindliche undurchsichtige Theil der Scheibe vor die Lichtquelle tritt. — Die berusste Fläche functionirt demgemäss in der Weise, dass sie die während der Beleuchtung momentan eingesogenen Strahlen in dem Augenblicke auch sofort wieder gleichsam ausathmet, in welchem die Beleuchtung unterbrochen wird.[1])

Dieses Ein- und Ausathmen bewirkt ohne Zweifel die Impulse auf die vom Röhrchen umschlossene Luft, die wir als Ton empfinden, und es wird von einigen Physikern weiters angenommen, dass hierbei auch transversale Bewegungen der berussten Lamelle mitwirken, die — wohl nur beim Ausathmen — in der Art eines Rückstosses entstehen mögen, ähnlich demjenigen, welchen ein Kahn erfährt, wenn Jemand aus demselben ans Ufer springt.[2])

Die Einrichtung endlich, dass die einzelnen Lochreihen mittelst Schieber von der Einwirkung des Lichtes ausgeschlossen werden können, ermöglicht eine beliebige Gruppirung der den Accord bildenden Intervalle, wie: Octave, Quinte, Quarte, grosse und kleine Terz, kleine Sexte, dann Dreiklang und Sextaccord. —

Wir beschliessen hiermit die Ueberschau der exotischen Klangerreger, um uns fortan mit jenen Tonquellen in eingehender Weise zu befassen, auf deren Anwendung die praktische Ausübung der Musik beruht.

---

[1]) Auch eine frei hängende, berusste Glasplatte tönt bei intermittirender, kräftiger Beleuchtung.

[2]) Diese Mitwirkung ist wohl fraglich, da, wenn man die Lamelle durch Watte ersetzt, ebenfalls Ton entsteht.

18. Vortrag.

(Die tönenden Körper. — Die menschliche Stimme.)

Wir wissen, dass der Klang durch periodische Stösse entsteht, welche die Schwingungen elastischer Körper auf die Luft ausüben. Diese Körper, insofern sie sich zu musikalisch-praktischer Verwendung eignen, in ihrem Verhalten als Tonerreger der Reihe nach kennen zu lernen, wird nunmehr unsere Aufgabe bilden.

Einen tönenden Körper kennen, heisst: seine Schwingungen kennen. Auf diese Erkenntniss gründet sich die Behandlung der gesammten Akustik seit Mersenne.

Hatte auch Josef Zarlino 50 Jahre früher schon gefunden, dass die Saite eines tieferen Tones langsamere Schwingungen macht, als die eines höheren, und daraus geschlossen, dass die Tonhöhe von der Zahl der Schwingungen abhänge, so war es doch erst Mersenne vorbehalten, das Verhältniss der Schwingungszahl zur Tonhöhe nachzuweisen und für jeden Ton festzustellen. Damit war der Weg erschlossen, sowohl die absoluten Schwingungszahlen für die Höhe der Töne wie die relativen für die Abstände der Intervalle in jedem gegebenen Falle zu finden.

Die allmälig entstandenen, verschiedenen, durch die Hilfsmittel, welche Mechanik, Optik und Elekromagnetismus darbieten, zu immer grösserer Vollkommenheit gebrachten Methoden haben es möglich gemacht, die absolute Schwingungszahl eines tönenden Körpers jederzeit, überall und unter allen Umständen mit der grössten Schärfe zu bestimmen.

Diese Methoden führten aber zugleich zur genaueren Kenntniss der Schwingungsformen und dadurch zur Erkenntniss, dass die Art, wie ein und derselbe Körper schwingt, nicht nur sehr mannigfaltig sein kann, sondern dass diese verschiedenen Formen gleichzeitig auftreten können, ja, dass es keinen tönenden Körper gibt, bei welchem dieses bis zu einem gewissen Grade nicht der Fall wäre

Die Coëxistenz verschiedener Schwingungsarten, die sich an Saiten, Drähten und Stäben, wie an Tonröhren leicht nachweisen lässt, und am Flammenrohre letzthin demonstrirt wurde, war schon den alten Orgelbauern bekannt, die auf empirischem Wege zur Er-

kenntniss der günstigen Wirkung gelangten, welche sich für den Klang ihrer Werke durch die Verstärkung der Partialschwingungen erzielen liess, und welche Theilschwingungen sie durch besondere Pfeifenreihen in den sogenannten Mixturen darstellten. Dass aber diese Partialschwingungen es sind, die den wahren Grund jener Erscheinung bilden, die wir Klangfarbe (timbre) nennen, diese hochwichtige Entdeckung verdankt die Wissenschaft der neuesten Zeit, und der Ruhm, diese Theorie aufgestellt und durch unumstössliche analytische wie synthetische Experimentalnachweise begründet zu haben, gebührt dem genialen deutschen Forscher Helmholtz.

Wir werden demnach im Sinne wissenschaftlicher Systematik vorgehen, wenn wir die tönenden Körper hauptsächlich auf die Schwingungsarten hin, deren jeder derselben fähig ist, untersuchen, und bezüglich der Eintheilung dieser Körper jener Gruppirung folgen, wie sie von Chladny, dem Begründer der modernen Akustik, aufgestellt wurde.

Er unterscheidet drei Hauptgruppen schwingender Körper.

Die erste umfasst Körper, welche durch Spannung elastisch werden, und deren Schwingungszahlen unter sonst gleichen Verhältnissen hauptsächlich von Spannungsänderungen abhängen. Diese Körper können linienförmig sein, wie Saiten, oder flächenförmig, wie Membranen.

Der zweiten Gruppe gehören Körper an, die durch innere Steifigkeit elastisch sind, also nicht erst der Spannung bedürfen, um tonbildende Schwingungen vollführen zu können. Auch diese Körper können linienförmig sein, und zwar geradlinig wie Stäbe, Röhren, krummlinig wie Ringe, Triangeln, Stimmgabeln, oder sie können Flächenform haben, und zwar ebenflächige wie Scheiben, oder krummflächige wie Glocken und sonstige Hohlgefässe.

Die dritte Gruppe bilden Körper, die durch molekuläre Dichterstellung mittels Zusammendrückung, mithin durch einen, dem Vorgange in den Körpern der ersten Gruppe entgegengesetzten Process elastisch werden. Dahin gehören die atmosphärische Luft und andere Gase, dann die tropfbaren Flüssigkeiten. Wenngleich die Körper der beiden ersten Gruppen sowohl Quer- wie Längsschwingungen zu vollführen vermögen, so werden wir, die wir bei unseren Excursen in das Gebiet der Akustik hauptsächlich dasjenige ins Auge zu fassen haben, was uns als Musikern praktisch zweck-

dienlich sein kann, uns hier vorzugsweise mit jenen tönenden Körpern und mit jenen ihrer Schwingungsarten, die in der Musik Verwendung haben, befassen, und hiebei die ihrer Wichtigkeit entsprechende Reihenfolge einhalten.

Wir werden demnach vor Allem die Schwingungen der Saiten, dann der von Röhren umschlossenen Luftsäulen, beziehungsweise die hierauf gegründeten Saiten- und Blasinstrumente in Betrachtung ziehen, und sodann jene Tonwerkzeuge folgen lassen, denen die Schwingungen von Membranen, elastischen Stäben und Flächen zu Grunde liegen, wohin beispielsweise Stimmgabeln, Stahlspiele, Xylophone, Spieluhren, Maultrommeln, die Eisenvioline, Glasharmonika, Klangplatten und Glocken, und die verschiedenen krustischen, vorzugsweise rhythmische Verwendung findenden Instrumente, wie Pauken, Trommeln, Becken, Triangeln, Tambourinen, Castagnetten gehören. Von den Schwingungsarten selbst aber werden bei den linienförmigen festen Körpern vorwiegend nur die Transversalschwingungen in Betracht kommen, während die Längsschwingungen nur dort näher ins Auge zu fassen sein werden, wo sie, mit den Querschwingungen gleichzeitig auftretend, auf die Klangfarbe Einfluss zu üben geeignet sind. —

Sie werden in der soeben vorgetragenen Eintheilung eine Tonquelle von fraglos ebenso bewunderungswürdiger Beschaffenheit als höchster künstlerischer Bedeutung vermissst haben: die menschliche Stimme.

Den bei der Erzeugung seiner Töne stattfindenden fundamentalen Vorgängen gemäss, wäre das Stimmorgan des Menschen (und ebenso der meisten Thiere) scheinbar am passendsten in die letztgenannte (dritte) Gruppe, und zwar speciell in die Klasse der Blasinstrumente mit kesselartigem Mundstücke einzureihen, da es mit diesen die meisten Analogien aufweist, indem der Ton hier wie dort durch Luft hervorgerufen, durch schwingende Membranen von nahezu gleichartiger Beschaffenheit, wie es die Lippen des Mundes und die Stimmbänder des Kehlkopfes sind, erzeugt, und durch einen Resonanzraum — dort der Mund, hier das Ansatz- oder Tonrohr — ausgebildet wird. Allein die Punkte, in welchen diese Vorgänge bei näherem Hinblicke von einander abweichen, sind so wesentliche, dass die menschliche Stimme, abgesehen von der ihr als einer sozusagen

selbstthätigen Tonquelle zukommenden Ausnahmsstellung, jede nur einigermassen strenge Parallele mit anderen Tonkörpern alsbald abweist.

Schon der Umstand, dass die Tonhöhe der menschlichen Stimme ausschliesslich von der Schwingungszahl der tonbildenden Stimmbänder, und diese Zahl wieder lediglich von der Spannung und Länge des jeweilig schwingenden Theiles der Stimmbänder abhängt, während bei der erwähnten Instrumentenklasse die Tonhöhe durch die jeweilige Länge der schwingenden Luftsäule des Klangrohres bestimmt wird, und der zwischen den Lippen des Bläsers austretende intermittirende Luftstrom nur den die Resonanz des Tonrohres hervorrufenden Primitivimpuls liefert, während die Schwingungszahl der Lippen an jene des hervorgerufenen Rohrtones gebunden ist, — schon dieser Umstand allein setzt der weiteren Analogie in dieser Richtung eine Grenze.

Noch weiter weichen die Verhältnisse von einander ab, wenn wir die Technik der Tonerzeugung ins Auge fassen.

Diese ist bei den Instrumenten ein vorwiegend mechanischer Process, der sich äusserlich wahrnehmen, an Griffen u. dgl. zeigen, daher auch lehren und nachmachen lässt. Die Stellungen und Spannungen der Stimmbänder dagegen, auf welchen die Tonhöhe der Menschenstimme ausschliesslich beruht, können nicht gezeigt und nicht gelehrt werden, denn sie sind das Ergebniss einer rein physiologischen, mithin unbewussten Thätigkeit. Um hohe oder tiefe Töne hervorzubringen, genügt das Wollen; dass wir die Stimmbänder in dem einen Falle mehr, im anderen weniger spannen, sie ihrer ganzen Länge und Breite nach oder nur theilweise schwingen lassen müssen, und wie wir dies anstellen, davon haben wir kein Bewusstsein. Das menschliche Stimmorgan hat in der Mundhöhle zwar ein Ansatzrohr gleich den genannten Blasinstrumenten, allein es dient nicht, wie bei diesen zur Darstellung der Tonhöhe (was bei der Stimme die Stimmbänder allein besorgen), sondern zur Erzeugung jener eigenthümlichen Modification des Klanges eines und desselben Tones, die man Vocalisation nennt.

Um von dem Stimmorgane in Bezug auf das phonische Zusammenwirken seiner Theile eine sinnfällige Vorstellung zu geben, hat man die Construction einer sogenannten Zungenpfeife als Ver-

gleichsbild herangezogen. So sagt Hyrtl: Der Kehlkopf gehört zu den sogenannten Zungenwerken mit membranösen Zungen. Nach musiktechnischem Sprachgebrauche versteht man unter Zungenwerk wohl nur eine chromatisch geordnete, über mehrere Octaven sich erstreckende Reihe von Zungentönen, welche, wenn es sogenannte freischwingende sind, das Harmonium (Concertine, Zugharmonika u. dgl.), oder, mit Schallkörpern versehen, die sogenannten Zungenregister vulgo Rohrwerke der Orgeln und ähnlicher Instrumente bilden.

Ein Musikinstrument mit membranösen Zungen, die schon im Hinblicke auf die Veränderlichkeit des Materials, sowie mit Rücksicht auf die unumgänglich erforderliche Stetigkeit der Stimmung nicht verwendbar wären, gibt es aber nicht. Weiters trifft der Vergleich auch hinsichtlich der Form der, für musikalische Zungenpfeifen einzig geeigneten Metallzungen nicht zu, welche schmal und lang sein müssen, um deren Spitze zum Vollführen von Schwingungen geeignet zu machen, während eine Membrane nur der Breite nach schwingen kann, wie es unsere Lippen thun, wenn wir sie mehr oder weniger locker schliessen und nun mit entsprechender Kraft blasen; wie denn unsere Lippen mit den Stimmbändern, ausser der schon früher angedeuteten, auch die weitere Analogie aufweisen, dass wir durch den Grad ihrer Spannung und den der Stärke des Blasens, Töne im Umfange von fünf und mehr Octaven, von C_0 [1]) bis c^3, hervorbringen können, eine Leistung, mit welcher der gewöhnliche Umfang der Menschenstimme es nicht entfernt aufzunehmen vermag.

Was zum vergleichsweisen Heranziehen der Zungenpfeife zunächst geführt haben mag, dürfte der Umstand sein, dass der sogenannte Schallkörper (Aufsatz) der Zungenpfeife gleich dem Mund- Rachen- und Nasenhöhlenraume Modificationen des Charakters (nicht der Tonhöhe) des betreffenden Klanges bewirkt. Auch in Betreff der Entstehung des Klanges, nämlich hinsichtlich der Art und Weise, wie die Schwingungen der Stimmbänder und einer Pfeifenzunge eingeleitet und unterhalten werden, besteht eine gewisse Uebereinstimmung, auf welche später noch hingewiesen werden soll.

Aller Vergleich wird aber hinfällig bei der Erinnerung, dass die Zungenpfeife stets nur einen Ton von gleicher Höhe und Klangfarbe

---

[1]) Oskar Wolff bezeichnet diesen Ton als den tiefsten, den man mittelst der, zwischen den Lippen vibrirenden Zunge hervorrufen kann.

hören lassen kann, während die Menschenstimme eine umfangreiche Reihe von Tönen verschiedener Höhe hervorzubringen, und jedem Tone sowohl durch Ansatz wie durch Vocalisation eine andere Klangfarbe zu geben vermag.

Aus all' diesem erhellt, dass die Menschenstimme, als akustisches Instrument angesehen, in keine der vorgenannten Kategorien tönender Körper eingereiht werden kann, sondern in jeder Beziehung ihre specifische Betrachtung verlangt. —

Was nun die anatomische und physiologische Seite dieses wunderbar gebauten Instrumentes und die Functionen seiner einzelnen Theile betrifft, so soll nur das, zum Verständnisse unumgänglich Erforderliche hier angedeutet, sich mithin auf die, an der Erzeugung und Modification der Stimme in erster Reihe betheiligten Gebilde, als: Knorpeln, Bänder und Muskeln beschränkt werden.

Der wichtigste Theil ist der, hinter der Zunge in der Schlundhöhle beginnende, und bis fast zum Anfang des Brustbeines sich erstreckende Kehlkopf, der den klangerzeugenden Apparat, die Stimmbänder, umschliesst.

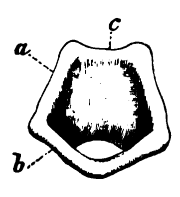


Fig. 136.

a Platte, *b* Ring, c vorn.

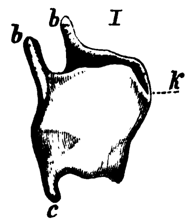


Fig. 137.

I. Seitenansicht: *bb* obere Hörner, *c* unteres Horn, *k* Adamsapfel.
II. Vorderansicht: *bb* Spitzen der oberen Hörner, *k* Adamsapfel.

Die Form des Kehlkopfes wird durch zwei Knorpel gebildet. Der tiefer liegende derselben ist der Grund- oder Ringknorpel (Fig. 136), zugleich der einzige im ganzen Bereiche des Stimmorganes vorhandene, der rings geschlossen ist, während der sogleich zu besprechende zweite, die Form des Kehlkopfes mitbestimmende Hauptknorpel: der Schild- oder Spannknorpel (Fig. 137 I. II.) und ebenso die später zu betrachtenden kleinen c-förmigen, in der Luftröhre eingebetteten Knorpelstreifen nach rückwärts offen sind.

Der Grundknorpel ist hinten nahezu viermal höher als vorne, von wo er allmälig ansteigt.

Der Spannknorpel besteht aus zwei, in einem Winkel von ungefähr 60° stumpf zusammenstossenden Platten (Fig. 137 I. II., dann

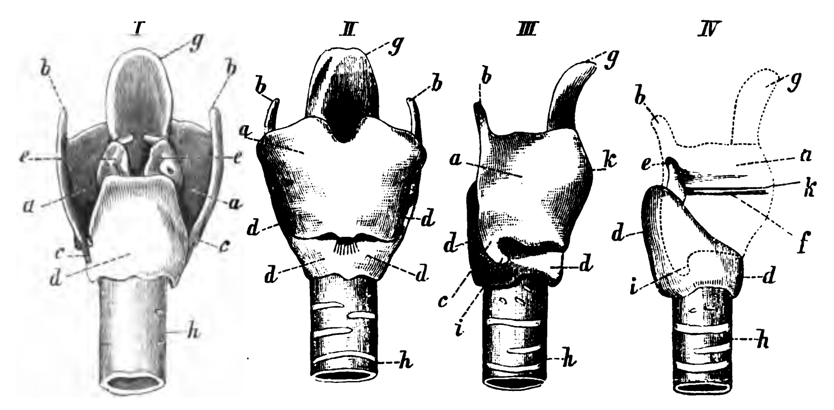


Fig. 138.

I. Kehlkopf von rückwärts. II. Kehlkopf von vorne. III. Kehlkopf im Profil. IV. Kehlkopf im Profil nach Entfernung des Spannknorpels.

(Die Buchstaben haben in diesen vier Bildern die gleiche Bedeutung.)

a Spannknorpel, *b* und *c* dessen oberes und unteres Horn, *d* Grundknorpel, *e* Stellknorpel, *f* Stimmband, *g* Kehldeckel, *h* oberer, in den Kehlkopf übergehender Theil der Luftröhre, *i* Verbindungs- und Drehpunkt von Spann- und Grundknorpel, *k* Adamsapfel.

Fig. 138 I—IV*a*), deren nach vorne gerichteter Winkel den sogenannten Adamsapfel (Fig. 137 I, II, und Fig. 138 III, IV*k*) bildet,

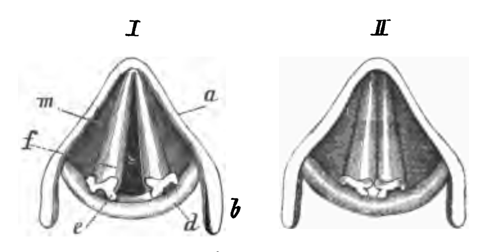


Fig. 139.

a Spannknorpel, *b* oberes Horn, *d* Grundknorpel, *e* Stellknorpel, *f* wahre Stimmbänder, *m* falsche Stimmbänder.

dessen Bewegungen man bei jedem Athemzuge, bei jedem Tone, bei jeder Schlingbewegung vorn am Halse mit dem Finger fühlen, an Männern auch mit dem Auge beobachten kann. Am hinteren Ende

laufen die Platten nach oben und nach unten in kleine hornförmige Fortsätze (Fig. 137 *b*, 138 *b*, *c*, 139 *b*) aus, deren untere mit den seitlichen Flächen des Grundknorpels durch Gelenke verbunden sind, deren Kapseln gleichsam eine feste Achse bilden (Fig. 138 III, IV *i*), um die der Spannknorpel seine auf- und absteigenden Bewegungen vollführt. —

Zwischen diesen beiden Knorpeln nun, welche dem Kehlkopfe seine Gestalt geben, sind die klangerzeugenden, sogenannten echten Stimmbänder ausgespannt (Fig. 138 IV *f*, 139 *f*). Häutige, an die länglich verengten Wandungen des Knorpelgerüstes rings angeheftete Gebilde, würden sie den ganzen Raum luftdicht abschliessen, wenn sich nicht in der Mitte eine, von dem Vereinigungswinkel des Spann-

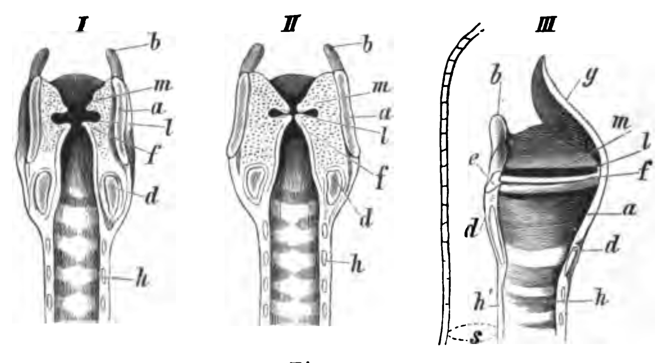


Fig. 140.

I und II. Vertikaler Durchschnitt des Kehlkopfes von rückwärts; III. seitlich gesehen.
(Die Buchstaben haben in allen drei Figuren dieselbe Bedeutung.)
a Spannknorpel, *b* oberes Horn des Spannknorpels, *d* Grundknorpel, *e* Stellknorper, *f* echte Stimmbänder, *g* Kehldeckel, *h* Luftröhre (vorne), *h'* Luftröhre (hinten), *l* Morgagnische Grube, *m* Taschen- oder falsche Stimmbänder, *s* Speiseröhre.

knorpels bis zur Platte des Grundknorpels reichende Spalte, »die Stimmritze«, befände. Die Ränder dieser Ritze bestehen aus einer feinen, sehr elastischen und widerstandsfähigen, sehnigen Membrane, in welche die häutige Textur der an den Wänden angehefteten Stimmbandmasse allmälig übergegangen ist. Die diese Ritze bildenden Stimmbänder, deren Länge bei Männern zwischen 13 und 15 Millimetern, bei Frauen zwischen 9 und 11 Millimetern variirt, messen in ihrer grössten Breite 3 Millimetern und können durch die Bewegungen der beiden erwähnten Knorpeln mehr oder weniger der Länge nach gespannt werden. Um die Ritze aber enger oder weiter zu machen,

dazu dient ein weiteres Knorpelpaar, die Stellknorpeln (Fig. 141) (auch Giessbeckenknorpeln genannt). Dieselben sitzen auf der Platte des Grundknorpels und ihre Aufgabe besteht darin, die Ränder der an sie angewachsenen Stimmbänder einander zu nähern oder von einander zu entfernen, und dadurch die Stimmritze zu erweitern oder zu verengern. Von rückwärts gesehen zeigen Figur 138 I *e*, dann 139 *e* die Gestalt dieser Knorpeln; in der Seitenansicht lässt sie Figur 138 IV *e* und 140 III *e* ersehen.

Ein weiteres knorpeliges Gebilde: der an die vordere Partie des Spannknorpels angeheftete Kehldeckel (Fig. 138 I—IV *g*, dann Fig. 140 III *g*) hat mit der Erzeugung der Stimme zwar nichts zu schaffen; er schützt aber den Stimmapparat vor dem Eindringen fremder Körper, indem er sich bei jeder Schlingbewegung über den Kehlkopf legt und ihn hermetisch abschliesst, so dass Speisen und Getränke über ihn hinweg in die unmittelbar hinter dem Kehlkopfe und seiner Fortsetzung der Luftröhre (Fig. 138 und 140 *h*), befindliche Speiseröhre (Fig. 140 III *s*) gleiten können, ohne dass das Geringste davon in den Stimmapparat zu dringen vermöchte.

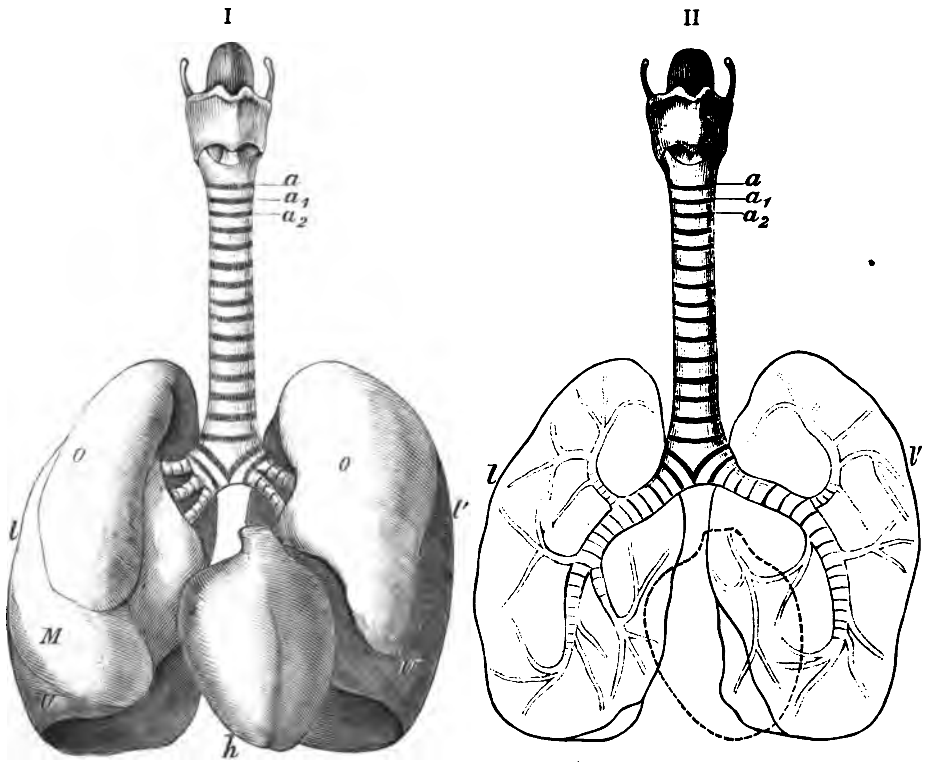


Fig. 141.

Dass alle bisher betrachteten Knorpeln ihre verschiedenen Bewegungen ohne das Eingreifen von Muskeln, deren Thätigkeit wiederum von den unserem Willen dienstbaren Nerven bestimmt und geregelt wird (theils auch unwillkürlich, wie dies z. B. beim Athmen, dann in pathologischen Zuständen stattfindet), nicht vollführen könnten, versteht sich von selbst; ich unterlasse es daher, durch Anführung und Beschreibung der betreffenden Muskeln und ihrer Functionen den ohnehin nicht einfachen Gegenstand zu compliciren. Es genügt zu wissen, dass jede Bewegung im Stimmapparate, sei es um Spannung oder Erschlaffung, Annäherung oder Entfernung, Verlängerung oder Verkürzung zu bewirken, durch das Eingreifen besonderer Muskeln erfolgt.

Der, aus dem Complexe der bisher geschilderten Theile bestehende Kehlkopf mündet nach oben in die, Resonanzräume bildende Mund- und Nasenhöhle und nach unten in die Luftröhre, die sich schliesslich rechts in einen dreigabeligen, links in einen zweigabeligen Ast (Bronchien) theilt, welche Aeste in die Lungen eintreten, um sich da in unzählige, immer kleiner und feiner werdende, das ganze Lungengewebe durchziehende Verzweigungen zu zerlegen (Fig. 142 I und II).

Die Luftröhre, deren Länge zwischen 90 und 120 Millimeter beträgt, wird durch einen häutigen Schlauch gebildet, in welchem in ziemlich gleichen Abständen 16 bis 20 c-förmige, den vorderen und die seitlichen Theile umschliessende transversale Knorpeln (Fig. 142 a, a^1, a^2 u. s. f.) eingebettet sind. Diese Knorpeln reichen



I. Gesammtbild von Kehlkopf, Luftröhre und Lungen. *O* Oberlappen, *M* Mittellappen, *U* Unterlappen. Die Lungenflügel *l l'* sind etwas zurückgeschlagen, um die Lage des Herzens *h* ersichtlich zu machen.

II. Verzweigung der Hauptäste der Luftröhre in den Lungen.

Fig. 142.

in ihrem Umfange nur bis dahin, wo die Luftröhre sich an die Speiseröhre lehnt (Fig. 138 I*h* und 140 IIIh^1). Dadurch bleibt dieser Theil der Luftröhre nachgiebig, wenn grössere Speisebrocken die Speiseröhre passiren. Der übrige Theil der Luftröhre aber wird durch die steifen Knorpelstreifen in seiner Form erhalten, denn ohne diese Versteifung würde die Luftröhre bei jedem Athemzuge infolge

der beim Ansaugen in der Röhre entstehenden Luftverdünnung zusammengedrückt und somit so luftundurchlässig werden, wie es beispielsweise eine nasse Cigarettenhülse wird, durch die man Athem holen wollte.

Die Lungen sind schwammige Gebilde; sie nehmen mittelst der Lungenbläschen (deren Zahl mit 17 bis 18 Millionen angegeben wird) die ihnen durch die Verästelungen der Luftröhre zugeführte Luft bei jedem Athemzuge auf. Das Einathmen erfolgt durch Spannung der Brustmuskeln, wodurch der Brustkorb erweitert wird und die Lungen veranlasst werden, Luft einzusaugen. Lässt die Spannung nach, so erfolgt das Ausathmen von selbst; bei starkem Singen oder Schreien treten die Muskeln mit entgegengesetzter Wirkung in Thätigkeit, um den Brustkorb noch mehr zu verkleinern und dadurch den Luftvorrath der Lungen rascher entleeren zu machen. Bei ruhigem Athemholen athmet ein gesunder Mensch 16 mal in der Minute, also ungefähr in vier Secunden einmal.

Dass das Athmen nicht blos deshalb geschieht, um in den Lungen einen Windvorrath anzusammeln, den man zum Sprechen, Singen u. dgl. benöthigt, sondern dass diesem Organe auch eine, für unser Leben weitaus wichtigere Aufgabe zufällt, werden Sie sofort zugeben, wenn Sie sich erinnern, dass diese letztere Function dieses Organes darin besteht, das ihm von der rechten Herzkammer mit jedem Pulsschlage zugeführte, während seines Kreislaufes verdorbene venöse Blut durch Austausch seiner Kohlensäure gegen den Sauerstoff der eingeathmeten, von den Lungenzellen aufgenommenen Luft in arterielles zu verwandeln, welches durch die linke Herzkammer zum Herzen zurückströmt, von wo es als Lebensstoff seinen neuerlichen Kreislauf nimmt. Die Kohlensäure aber wird ausgeathmet. Ein längeres Verbleiben derselben im Körper würde den Tod herbeiführen. — Die mittlere Lungencapacität eines Menschen mit gesunder Lunge beträgt im Ganzen beiläufig 760 Cubikcentimeter, die mit einem Athemzuge eingenommene Menge 470 Cubikcentimeter; der Rest von ungefähr 290 Cubikcentimeter bleibt stets zurück; er findet sich auch in den Lungen Verstorbener vor.

Schliesslich muss noch eines Gebildes Erwähnung gethan werden, welches zwar nicht an der Tonerzeugung betheiligt ist, wohl aber bei der Bildung hoher Töne mitzuwirken scheint. Es sind dies die

sogenannten Taschen- oder falschen Stimmbänder *m* (Fig. 140 I, II, III), die in einer Entfernung von 10—12 Millimeter über den echten liegen, von ihnen durch sackartige Höhlungen — »die Morgagni'schen Gruben *l*« (Fig. 140 I, II, III) getrennt sind; sie erscheinen als ein aus Schleimhaut gebildetes Faltenpaar und können durch Muskeleinwirkung veranlasst werden, sich auf die echten Stimmbänder herabzusenken, um sie mehr oder weniger in ihrer Schwingungsbreite zu begrenzen. Figur 140 II lässt eine dieser Stellungen ersehen.

Nachdem wir nun im Vorstehenden ein, in allerdings sehr einfachen Umrissen ausgeführtes anatomisches Bild[1]) unseres Stimmorganes erhalten haben, so können wir nun daran gehen, es in seiner phonischen Thätigkeit zu betrachten.

Man kann ein- oder ausathmen, ohne dass eine phonische Wirkung erfolgt. In diesem Falle werden die Stimmbänder (worunter stets nur die echten zu verstehen sind) die Stellung wie Figur 139 I annehmen. Bei heftigem Athmen wird in dieser Stellung blos Reibungsgeräusch entstehen. Soll Ton erfolgen, so haben die Stellknorpeln in Thätigkeit zu treten, um die Ränder der Stimmbänder einander zu nähern (Fig. 139 II), und gleichzeitig müssen Spann- und Grundknorpel die Bänder der Länge nach mehr oder weniger spannen. Dringt nun die, aus den Lungen durch die Luftröhre gegen die genäherten und gespannten Stimmbänder aufsteigende Luft heran, so werden diese — einem alsbald zu betrachtenden Gesetze folgend — in Schwingungen gerathen und es wird Ton entstehen, dessen Höhe und Stärke (Amplitude) im Allgemeinen von dem Masse des Zusammenwirkens der drei Factoren: Näherung und Spannung der Stimmbänder und Intensität des Luftstromes abhängen wird.

Das Princip, auf welchem die Hervorbringung der menschlichen Laute beruht, ist dasselbe, wie bei allen Tonwerkzeugen, deren Klang durch periodische Luftstösse entsteht, und wohin alle Lippen- und Zungenpfeifen, freien Zungen, Blasinstrumente und Sirenen zählen. Um Luftstösse zu erzeugen, muss der, aus den Lungen hervordringende Strom verdichteter Luft periodisch unterbrochen werden. Diess ist die Aufgabe der Stimmbänder, die dem Luftstrome das Austreten abwechselnd gestatten und verwehren. Könnte der Luftstrom seine

---

[1]) Die Theile werden meinen Hörern durch Wandtafeln anschaulich gemacht und an einem zerlegbaren Phantome erklärt.

Intensität, vermöge welcher er sich den Durchgang durch die Stimmritze erzwingt, indem er deren Ränder auseinandertreibt, unverändert beibehalten, so würde höchstens, wie bei heftigem Ausathmen, Geräusch, aber kein Ton entstehen können, weil die Stimmbänder am Zurückschwingen verhindert und somit ausser Stand wären, den Luftstrom periodisch zu unterbrechen und dadurch die, zur Tonerzeugung erforderlichen, intermittirenden Luftstösse entstehen zu machen. Eine solche constant unveränderte Intensität des Luftstromes kann aber aus folgenden Gründen nie zustande kommen. Sobald nämlich der von den Lungen aufsteigende Luftstrom vor den gespannten Stimmbändern anlangt, muss er sich hier so lange verdichten, bis er die nöthige Kraft erlangt hat, um die Spannung der Stimmbänder überwinden, deren Ränder auseinander treiben, und hierauf entweichen zu können. Allein in diesem Momente ist zwischen der entwichenen Luft vom höheren Drucke und der nachrückenden, minder dichten Luft vor den Stimmbändern eine Schichte relativ verdünnter Luft entstanden, die den Stimmbändern, vermöge ihrer eigenen, durch Verdrängung aus ihrer Ruhelage noch gesteigerten Elasticität gestattet in ihre frühere Lage zurückzukehren, wodurch dem nachrückenden Luftstrome der Austritt gesperrt und hiedurch seine abermalige Verdichtung herbeigeführt wird.[1])

Da von der Zahl der Luftstösse die Tonhöhe abhängt, so tritt die Frage nach dem Umfange der menschlichen Stimme, d. h. nach der geringsten und grössten Zahl der Schwingungen, welche die Stimmbänder in einer bestimmten Zeit zu vollführen vermögen, gleichsam von selbst heran.

Man theilt die Stimmen den Gattungen nach in männliche und weibliche, der Stimmlage nach in tiefe und hohe. Die ersten werden Bass und Tenor, die letzteren Alt und Sopran genannt. Durchschnittlich differirt die Tonlage der beiden Geschlechter um eine Octave, die der tiefen und hohen Stimmen um eine Quinte, und jede einzelne Stimme umfasst eine Tonreihe von zwei Octaven.

---

[1]) Auch in umgekehrter Weise, nämlich beim Ausathmen, ist man im Stande Töne hervorzubringen, deren Entstehen auf dem gleichen, oben geschilderten Vorgange beruht. Dass diese Töne schwerer ansprechen, hat in der Ungewohntheit solcher Erzeugung seinen Grund, und dass sie unschön, jeden Klangreizes baar, gleichsam erstickt klingen, erklärt sich aus dem Fehlen der Resonanz, welche die natürlich erzeugten Töne bei ihrer Passage durch die Hohlräume des Mundes und der Nase erwecken.

Im Allgemeinen wird das folgende Schema dem normalen Umfange der grossen Mehrzahl der Stimmen entsprechen:

Bass: f_0—f^1, Alt: f^0—f^2,
Tenor: c^0—c^2, Sopran: c^1—c^3.

Die menschlichen Stimmen beherrschen sonach ein Tongebiet von drei Octaven und einer Quinte, gleich einer diatonischen Scala von 26, oder einer chromatischen von 44 Tönen. Von Kinderstimmen sowie von Stimmen mit extravagantem Umfange nach Höhe oder Tiefe (beispielsweise bis ins a^3 reichende Soprane oder zum A_1 herabsteigende Bässe), dann von den als Zwischengattung zu betrachtenden Bariton- und Mezzosopranstimmen soll hier nur der Vollständigkeit wegen Erwähnung gethan sein.

Von welcher Stimmlage immer man aber auch die, ihrer Lage entsprechende Tonleiter ansteigend ausführen lässt, so wird man — besonders wenn man es mit Ungeübten zu thun hat — stets die Wahrnehmung machen, dass der Charakter des Stimmklanges während einer Reihe von Tönen der gleiche bleibt, und dass diese Töne mühelos hervorgebracht werden, dass sie aber bei weiterem Ansteigen immer angestrengter klingen, bis plötzlich ein Umschlag erfolgt, von welchem ab der Stimmklang ein wesentlich veränderter erscheint. Die Stimme ist, wie man zu sagen pflegt, in ein neues Register übergegangen. Ein solcher Uebergang tritt nach einer weiteren Reihe ansteigender Töne abermals ein und wird von den gleichen Erscheinungen, wie der frühere, begleitet.

Die Grenzen der, innerhalb eines jeden Registers befindlichen Tonreihe sind nach oben durch das erfolgende Ueberspringen der Stimme in das nächst höhere Register, und in dem höchsten durch das gänzliche Versagen der Stimme gezogen.

Eine Erweiterung der Register nach oben ist durch Uebung zwar zu erreichen, dei Uebergang wird aber dadurch nur noch greller, weil die anschliessenden tiefen Töne der nächsten Tonreihe jetzt umsomehr durch ihre relative Schwäche von der, trotz aller Uebung dennoch forcirten Klangfarbe des Grenztones sich abheben.

Nach unten dagegen lassen sich in jedem der höheren Register Töne mit Leichtigkeit hervorbringen, die noch der natürlichen Tonlage des nächst tieferen Registers angehören; allerdings werden sie, je weiter sie herabreichen, um so schwächer.

Hier nun die Grenzen so ineinander zu führen, damit der unmerkliche Uebergang von einem Register in das andere und somit die Ausgleichung der Stimme in ihrem ganzen Umfange erzielt werde, bildet die eigentliche und zugleich höchste Aufgabe des Gesangunterrichtes, eine Aufgabe, unter welcher jedoch heute vielfach lediglich das Einstudiren von Opernpartien verstanden wird.

Es erübrigt uns jetzt noch die Untersuchung: welche Gestalt der Stimmapparat bei der Hervorbringung der, den verschiedenen Registern zukommenden Tonreihen annimmt, und welche Thätigkeiten den verschiedenen Theilen des Kehlkopfes hiebei obliegen.

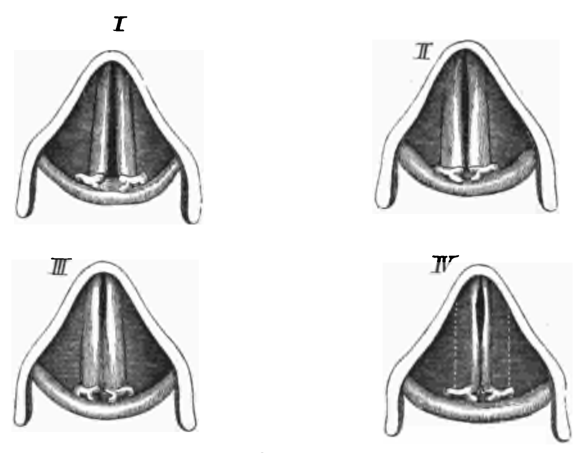


Fig. 143.

Bei tiefen Tönen klaffen die Ränder der Stimmbänder ihrer vollen Länge nach ziemlich weit von einander (Fig. 143 I). Da sie wenig gespannt sind, worauf auch der tiefstehende Spannknorpel deutet, und nicht nur ihrer vollen Länge, sondern auch ihrer ganzen Breite nach schwingen, so erfolgen ihre Vibrationen nothwendig langsam, da auch der häutige, massige, daher schwerer bewegliche Theil der Stimmbänder an den Schwingungen theilnimmt. Die tiefen Töne, zumal wenn sie kräftig sein sollen, erfordern eine starke und zugleich reichliche Zuströmung der Luft, da ein Theil derselben in Folge der Weite der Stimmritze wirkungslos entweicht. Je höher die Töne werden sollen, umsomehr verengt sich bei unveränderter Länge die Stimmritze in Folge der, die Stimmbandränder einander nähernden Action der beiden Stellknorpel. Zugleich nimmt die Längs-

spannung durch Hinaufgehen des Spannknorpels und Zurückweichen des Grundknorpels so lang zu, als die Stimmbänder in dieser ihrer Stellung, nämlich in voller Länge vibrirend, überhaupt noch fähig sind, nach Ueberschreitung eines bestimmten Spannungsgrades Schwingungen zu vollführen.

Beim Uebergang in die mittlere Tonlage erhalten die Stimmbänder die aus Figur 143 II ersichtliche Stellung. Sie sind an ihren beiden Enden völlig geschlossen; der dazwischen liegende Theil der Ränder zeigt die Form einer Linse. Spann- und Grundknorpel kehren nahezu in ihre usprüngliche Lage zurück, die Spannung ist bei den tieferen Tönen dieser Tonlage gering, reicht aber dennoch für die relativ höheren Schwingungszahlen aus, nachdem die schwingende Länge der Ränder geringer ist als früher, und auch der die Vibrationen verzögernde, häutige Theil der Stimmbänder an den Schwingungen immer weniger theilnimmt, je höher die Töne ansteigen. Es wiederholt sich nun genau der frühere Vorgang: der Spannknorpel steigt empor, der Grundknorpel weicht zurück, die Spannung der Bänder und damit die Verringerung der Spaltbreite nimmt zu, bis endlich alle diese Factoren an der Grenze ihres Weiterkommens angelangt sind. Es erfolgt der Uebergang in die hohe Tonlage, wobei die Stimmbänder die Gestalt annehmen, wie Figur 143 III sie darstellt. Die linsenförmige Spalte ist nach vorwärts gerückt und fast halb so klein geworden als früher; die andere, rückwärtige Hälfte zeigt fest aneinander geschlossene Ränder, die an der Schwingung nicht mehr theilnehmen. Der schwingende vordere und jetzt ausschliesslich membranöse Theil der Stimmbänder ist in Folge seiner Verkürzung und geringen Breite geeignet geworden, auch ohne erhebliche Längsspannung schnelle Vibrationen zu vollführen und daher die Töne, zumal die der unteren Grenze nahen, mit Leichtigkeit hervorzubringen. Auch beim Uebergange in diese Stimmlage lässt die Längsspannung nach, wie denn überhaupt der Verlauf aller Vorgänge der gleiche ist wie zuvor.

Bei ganz hohen Tönen tritt aber noch ein weiterer Factor ins Spiel: es sind diess die falschen Stimmbänder, die sich auf die schwingenden (wahren) herabsenken (s. Fig. 140 II *m* und 143 IV) und damit die Stimmbandmasse bis auf eine mehr oder minder verschmälerte Partie des äussersten Randes von der Betheiligung an den Schwingungen ausschliessen.

Wiewohl das vorstehend Ausgeführte im Zusammenhalte mit den, den einzelnen Stimmlagen zukommenden Kehlkopfbildern leicht erkennen lässt, dass die Klangfarbe der einzelnen Register, zumal aber die solcher Töne, welche angrenzenden Registern gemeinsam sind, nothwendig eine verschiedene sein muss, so sollen jetzt einige praktische Beispiele die gewonnene Vorstellung unterstützen und zugleich die akustisch-gesetzliche Begründung der, die einzelnen Tonlagen charakterisirenden Klang- und sich ergebenden Stärkeverschiedenheiten liefern. Wir führen die Beispiele an einer Saite von bestimmter Spannung aus, und bedienen uns hiezu eines beliebigen Streichinstrumentes oder des mit einer Darmseite versehenen Monochordes.

Wir nehmen an, die ursprüngliche Spannung sei eine geringe, der Ton daher ein tiefer. Dem entsprechend wird der Klang auch bei grosser Amplitude der Schwingungen auf ein gewisses bescheidenes Mass von Stärke und Fülle beschränkt bleiben. Spannen wir nun die Saite allmälig mehr und mehr, so werden die Töne immer mehr an Höhe, zugleich aber an Kraft und Klangfülle zunehmen. Allein das Spannen einer Saite, soll sie nicht reissen, hat seine Grenzen. Um nun höhere Töne zu gewinnen, werden wir die Saite verkürzen, zugleich aber, um mit ihr in dieser reducirten Länge die gleichen Spannungsversuche vornehmen zu können, sie auf die ursprüngliche geringe Spannung zurückführen müssen. Haben wir die Saite jetzt soweit verkürzt, dass ihr Ton mit dem, ihr zuvor durch die höchste Spannung bei ganzer Länge abgenommenen übereinkommt, so wird der Unterschied beider an Klangfarbe wie Klangfülle ein auffallender sein; der Ton der verkürzten Saite wird uns matt und leer erscheinen gegen den glänzenden, kraftstrotzenden der ganzen Saitenlänge. Lassen wir nun aber in dieser Lage die Spannungen in gleicher Weise wie früher wachsen, so wird sich zunehmend auch Kraft und Fülle der Töne einstellen, je höher sie ansteigen.

Die Klangfarbe der Töne der verkürzten Saite ist allerdings verschieden von der, mit voller Saitenlänge erzielten; dafür aber vermochten wir zufolge dieser Verkürzung auch zu Tonregionen aufzusteigen, welche der ganzen Saite unerreichbar sind. Wir können nun die Procedur weiterer Verkürzungen der Saite, um bei reducirter Spannung gleiche, aber wieder anders klanggefärbte, oder unter Anwendung abermaliger Spannungssteigerung zunehmend höhere und

vollere Töne zu erzielen, wiederholen; endlich aber werden wir auch bei einem Punkte anlangen, der uns ein *nec ultra* zuruft, bei dem Punkte nämlich, wo die Dicke der Saite zu ihrer Länge in einem Verhältnisse steht, welches ein Hervorrufen von Schwingungen unmöglich macht.

---

19. Vortrag.

(Die menschliche Stimme, Fortsetzung. — Bildung der Vocale. — Vocal-Flammenbilder.)

So wie wir uns in anatomisch-physiologischer Hinsicht auf die letzthin vorgetragenen Ausführungen über unser Stimmorgan beschränken wollen, so muss hier auch darauf verzichtet werden, auf dasjenige einzugehen, was dessen Ausbildung und künstlerische Verwendung betrifft und in das Gebiet der praktischen Musikwissenschaft gehört.

Vom streng physikalisch-akustischen Standpunkte aus werden wir uns sohin mit der Menschenstimme nur so weit zu befassen haben, als es sich darum handeln wird, die Gründe ihres Klangcharakters sowohl im Allgemeinen, insbesondere aber bei der Bildung der Selbst- und Mitlauter kennen zu lernen.

So wenig auf sämmtlichen Bäumen eines noch so grossen Waldes zwei absolut gleiche Blätter vorkommen, ebenso wenig gibt es zwei Menschen mit absolut gleichem Stimmklange. Irgend eine entscheidende, wenn auch noch so kleine Nuance wird bestehen, die es uns möglich macht, zwei scheinbar noch so gleiche Töne verschiedener Kehlen zu unterscheiden und wieder zu erkennen, ohne dass wir die Personen sehen oder kennen.

Zu diesen Nuancen tragen sowohl der anatomische Bau der vielen einzelnen Bestandtheile, die bei der Bildung des Klanges der Stimme in Thätigkeit treten, wie das gegenseitige Verhältniss der Masse, der Stärke, der Spannkraft und der natürlichen oder durch Uebung erworbenen und ausgebildeten Anpassung zu gewissen Stellungen dieser Theile zu einander wesentlich bei; nicht minder aber auch die

Art, wie wir die Töne erzeugen, was sowohl von der Richtung, in welcher wir die, von der Stimmritze ausgesendeten Schallstrahlen nach den verschiedenen Resonanzräumen der Mund-, Rachen- und Nasenhöhle senden, wie von der Energie oder Trägheit abhängt, mit der wir alle diese Functionen vollführen, und an deren Aeusserung das psychologische Moment in ebenso reichem Masse betheiligt ist, wie das physiologische.

Trotz der unendlichen Mannigfaltigkeit des individuellen Charakters der Menschenstimme vermögen wir doch unter allen Umständen ihre Töne mit voller Sicherheit als der menschlichen Kehle entstammende zu erkennen, und von allen anders gearteten Tonquellen zu unterscheiden. Dieses unfehlbare Merkmal bieten uns die Vocale, ohne deren Geleite kein Ton den Mund des Menschen verlassen kann. Der bei geschlossenem Munde gesungene Nasenton, auch Brummstimme genannt, nähert sich im Allgemeinen dem U-Klange, besonders bei tiefen Tönen; bei höheren kann man mit einiger Geschicklichkeit *a* und *i* hervorbringen. Auch sei bemerkt, dass tiefe Nasentöne (am besten die der oberen Hälfte der grossen Octave entnommenen) deutlich den dritten Theilton hören lassen, was durch Resonatoren nachweisbar.

Die Charakteristik des Klanges der Menschenstimme erscheint also im Vocalklange begründet, und wir stehen sonach jetzt vor der Frage, wie entstehen die Vocale und wodurch unterscheiden sie sich?

Wenn wir verschiedene Vocale aussprechen, so empfinden wir, dass mit unserer Mundhöhle, mit der Stellung der Zunge, der Zähne und der Lippen bestimmte Veränderungen vorgehen, die ohne unser weiteres Hinzuthun regelmässig in derselben Weise erfolgen, beziehungsweise wiederkehren, so oft wir denselben Vocal aussprechen. Diese Veränderungen, soweit sie sich auf das Aeussere beziehen, können wir zudem an Anderen, oder durch den Spiegel an uns selbst wahrnehmen.

Durch diese Veränderungen nun modificiren wir den Innenraum des Mundes in verschiedener Weise, indem wir ihn im Verhältnisse zur Mundöffnung bald erweitern, bald verengen, und ihm Formen geben, die mehr oder weniger der runden einer Kugel, der länglichen eines Eies, oder jener einer Flasche mit bald nach Aussen, bald nach Innen gekehrtem, engerem Halse gleichgekommen.

Nun hat bekanntlich jeder Hohlraum Eigenton, der in Bezug auf seine Höhe dem Luftvolumen des Hohlraumes proportional ist. Offenbar wird dies auch bei unserer Mundhöhle der Fall sein, und wir können uns davon auf mehrfache Weise überzeugen.

So brauchen wir nur die O-Stellung unseres Mundes in jene des A zu überführen, und während dieses Vorganges rasch mit dem Finger oder einem Bleistift, einem flachen Brettchen oder mit einem Kaffeelöffel auf die Wange leichte Schläge führen, und wir werden eine deutliche, wahrnehmbare, beliebige Tonleiter hervorbringen, deren Endtöne zwischen f^1 und c^3 liegen, aus welcher Tonreihe besonders auffallend das b^1 bei O und das b^2 beim A hervortreten. Auch wenn wir bei entsprechender Mundstellung mit flüsternder Stimme den sogenannten Kehlschlag ausführen, werden diese charakteristischen Eigentöne der Mundhöhle auftreten.

Lassen wir auf b^1 und b^2 abgestimmte Stimmgabeln vor der Oeffnung des Mundes in den betreffenden Stellungen von O und A erklingen, so werden sie sehr laut tönen, während der von anders gestimmten Gabeln geweckte Resonanzton ein viel schwächerer sein, oder ein solcher überhaupt nicht zu Stande kommen wird, je nachdem sich der Gabelton von dem Eigentone der Vocalstellung weniger oder mehr entfernt, wie dies der Versuch lehren wird, den wir jetzt mit Gabeln von b^1 und b^2 und hierauf mit Gabeln für f^1, e^1 und g^1 vornehmen wollen.



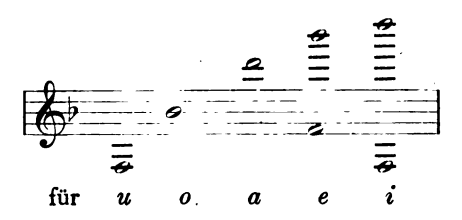
Fig. 144.

Das gleiche Resultat erreichen wir, wenn wir mittelst einer, durch einen Schlauch mit dem Gebläse verbundenen Anblasespalte (Fig. 144) vor der Mundöffnung einen bandförmigen Luftstrom vorüberstreichen lassen und damit die Mundhöhle gleichsam wie eine Flasche oder gedeckte Röhre anblasen und zum Tönen bringen.

Die erschöpfendste Analyse der Vocalklänge hat Helmholtz mittelst der von ihm ersonnenen Resonatoren geliefert.

Es sind dies die Ihnen bereits bekannten Hohlkugeln aus Glas oder Metall, oder Röhren aus Pappe oder sonstigen Stoffen, die für

beliebige Töne genau abgestimmt sind. Mittelst derselben bestimmte er die Eigentöne der Selbstlauter wie folgt:



R. **König** dagegen fand für die reinen Vocale durchaus Octaven von *b* als Eigentöne, und zwar:

	b^0	b^1	b^2	b^3	b^4
für	*u*	*o*	*a*	*e*	*i*

Es sind also nach Helmholtz die drei dunkelsten Vocale durch einen, die helleren durch zwei Eigentöne charakterisirt. (Letzteres liesse sich durch die flächenähnliche Mundform erklären, wonach je ein Ton, und zwar der höhere dem Halse und der tiefere dem Bauche der Flasche entspräche.)

Die mit Stimmgabeln f^0 und b^1 vor gleichgestimmten Flaschen hervorgerufenen Töne lassen die Vocalfärbung von U und O deutlich erkennen (Fig. 145).

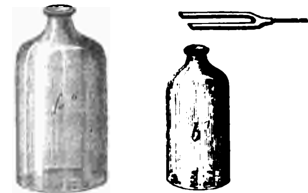


Fig. 145.

Dass die Dialectfärbung der Vocale Einfluss auf die Höhe ihres Eigentones hat, ist selbstverständlich, doch sind diese Differenzen nicht von zu grossem Belange, wie denn überhaupt die Eigentöne fast unabhängig sind vom Geschlecht und Alter. Was den weiblichen und kindlichen Mundhöhlen an Geräumigkeit abgeht, gleicht sich durch die vertiefende Wirkung des engeren Verschlusses der Mundöffnung aus.

Da nun die Vocaltonhöhe nach den Resultaten dieser analytischen Untersuchung eine stetige sein und bleiben muss, weil sonst mit jeder Abänderung derselben auch der Vocal ein anderer werden müsste, so wird diese Tonhöhe unbeeinflusst bleiben durch die Höhe eines jeden beliebigen Tones, den wir zu dem betreffenden

Vocale singen, denn dieser letztere Ton hängt nicht von der Resonanz der Mundhöhle, sondern von der Spannung der Stimmbänder ab.

Dass die auf letztere Art erzeugten Töne, gleichwie die den meisten Tonquellen entstammenden, keine einfachen, sondern aus vielen einzelnen Tönen zusammengesetzte Klänge sind, werden Untersuchungen über das Wesen der musikalischen Klangfarbe überhaupt, zu welchen wir später gelangen, ausführlich darthun.

Es werden sonach Singtöne, deren Partialklänge mit dem Eigentone des Vocalklanges ganz oder nahe übereinstimmen, durch den Resonanzton des Vocales mehr oder weniger verstärkt. Ein Beispiel soll diesen Zusammenhang klar machen, wobei uns zur leichteren Orientirung die von Professor Mach ersonnene Obertöne-Claviatur (Fig. 146) gute Dienste leisten wird. Die Anwendung dieser sinn-

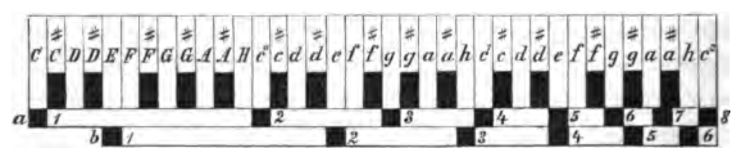


Fig. 146.[1])

reichen Vorrichtung ist höchst einfach. Man zeichnet die Streifen *a* und *b* genau nach und schneidet sie der Länge nach entzwei. Legt man die Marke 1 des Streifens *a* an eine beliebige Taste der gezeichneten Claviatur an, so werden die Marken 2, 3, 4 u. s. w. die Obertöne des Tones dieser Taste anzeigen. (Der zweite Streifen kommt im folgenden Versuche nicht zur Anwendung. Wir werden denselben später beim Capitel der Schwebungen zur Erläuterung heranziehen.)

Es werde, um nun an die Ausführung unseres Beispieles zu gehen, die chromatische Tonleiter vom kleinen c^0 aufwärts zum Vocal A- gesungen, dessen Eigenton, wie erwiesen, das b^2 ist.

Diesem nach fällt:

Vom c^0 der 7. Partialton auf $\underline{\underline{b^3}}$ [2])

» *cis* » 7. » » $\underline{h^2}$

[1]) Die hier angegebenen Tonhöhen müssen in Anwendung auf das folgende Beispiel um eine Octave höher gedacht werden.

[2]) Die Striche unter den Tönen bezeichnen den relativen Stärkegrad der Resonanz, welcher mit der zunehmenden Höhe der Partialtöne verhältnissmässig abnimmt.

vom	*d*	der	6.	Partialton	auf	a^2
»	*dis*	»	6.	»	»	*ais*^{2}
»	*e*	»	6.	»	»	h^2
»	*f*	»	5.	»	»	a^2
»	*fis*	»	5.	»	»	*ais*^{2}
»	*g*	»	5.	»	»	h^2
»	*gis*	»	5.	»	»	*ais*^{3}
»	*a*	»	4.	»	»	a^2
»	*b*	»	4.	»	»	b^2
»	*h*	»	4.	»	»	h^2

und es erscheinen mithin durch die Resonanz des Vocaltones begünstigt: am stärksten: *dis, fis, b*; weniger: *c, d, f, a*; noch weniger, weil als höhere Patialtöne an und für sich schwächer: *cis, e, g, h*; am wenigsten: *gis*. —

In gleicher Weise können selbstverständlich die Coïncidenzen der Singtöne in den tieferen und höheren Octaven und mit den übrigen Vocaltönen gefunden werden.

Soll nun auch Gesangscomponisten eine strenge Beachtung dieser Regel, die ihrer Phantasie zugestandenermassen unerträgliche Bleigewichte aufbürden würde, keineswegs zugemuthet werden, so kann es doch immerhin Fälle geben, in welchen sich die klanglichen Vortheile dieser Coïncidenzen sehr wohl verwerthen lassen, so namentlich bei Textübersetzungen.

Helmholtz, der sich mit der Analyse nicht begnügte, lieferte auch den synthetischen Beweis für seine Lehre, indem er durch die Klänge elektro-magnetisch bewegter Stimmgabeln, die er vor Resonanzröhren schwingen liess, die Vocalklänge darstellte.

Von einer anderen, minder complicirten Methode, den Klang einiger Vocale künstlich zu erzeugen, sollen Sie jetzt eine kleine Probe erhalten. Eine beiderseitig schräg abgeschnittene Röhre mit zwei dünnen Kautschukstreifen so geschlossen, dass zwischen ihnen eine enge Spalte offen bleibt, erzeugt, angeblasen, einen Ton in der-

selben Weise, wie die menschlichen Stimmbänder[1]), deren anderweite Functionen zu demonstriren dieser Apparat sich ebenfalls eignet (Fig. 147).

So lassen sich durch Verkürzung der Ritze, wie durch Aenderungen der Spannung Modificationen der Tonhöhe bewirken. Weiters lässt sich damit auch der Beweis führen, dass, wie dies schon von Pelissov behauptet wurde, Sprechen und Singen möglich ist, wenn auch ein Stimmband in Folge Lähmung oder aus sonstiger Ursache unthätig ist, falls nur das andere ungehindert functionirt. Seine weitere Behauptung, dass überhaupt beim Sprechen wie beim Singen stets nur eines der Stimmbänder sich im Schwingungszustande befindet, hat der Kehlkopfspiegel dagegen widerlegt. Stülpt man einmal ein mit verengter Oeffnung versehenes, auf b^1 abgestimmtes, dann wieder ein ganz offenes, den Ton b^2 oder b^3 wiedergebendes Resonanzrohr darüber, so wird der Klang unserer Membrane im ersten Falle ziemlich erkennbar dem Vocale O, im zweiten dem Vocale A, im dritten dem Vocale E gleichkommen und diesen Charakter beibehalten, auch wenn wir den Membranton durch stärkere Luftpressung erhöhen. Bedeckt man in Nachahmung des Lippenverschlusses die Röhrenöffnung mit der Hand und entfernt diese mehr oder weniger rasch zweimal hintereinander, so wird man die Silben Papa und Mama vernehmen. Mit einigen Modificationen lassen sich die Silben: Lala, Lele, Pepe, Meme und die Vocale Ö und Ü hervorrufen. —

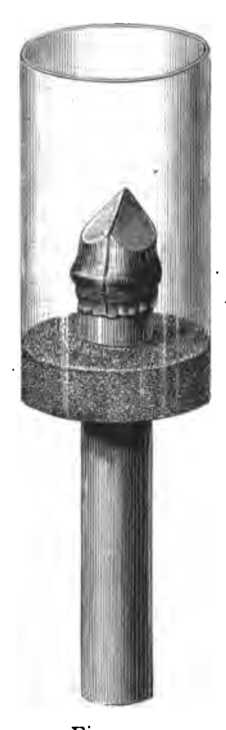


Fig. 147.

Dass die aus verschiedenartigen, explosiven, zischenden, blasenden, rasselnden Geräuschen sich zusammensetzenden Consonanten, wiewohl sie beim Singen von ihrer Bestimmtheit Einiges einbüssen, wesentlich

[1]) Man kann den Apparat mit dem Munde anblasen; wegen der folgenden Experimente ist es jedoch bequemer, ihn mit einem Gebläse zu verbinden.

die Stimme charakterisiren und individualisiren, bedarf wohl keiner ausführlichen Begründung.

Versuche zur künstlichen Nachbildung nicht nur der Vocale, sondern der Sprache überhaupt, wurden übrigens schon im vorigen Jahrhunderte angestellt und auch in unserem fortgesetzt. Dahin zählen insbesondere die Sprechmaschinen von Kratzenstein und Kempelen, dann deren Verbesserungen durch Posch und Faber.

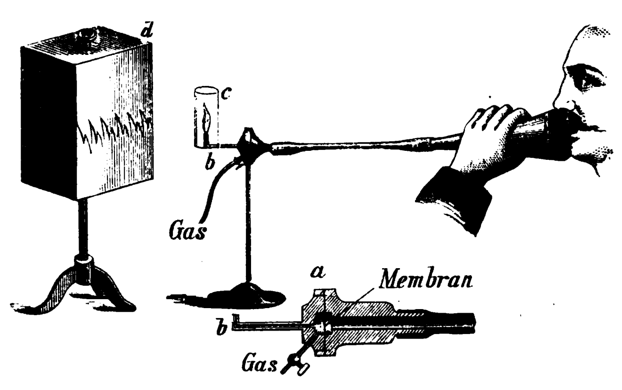


Fig. 148.

Eine vorzügliche Methode, die Verschiedenheiten der Vocalklänge und die, der Zusammensetzung ihrer charakteristischen Eigentöne entsprechenden Schwingungsformen zur Anschauung zu bringen, hat der berühmte Akustiker Rudolf König in Paris in seinem, auf das Princip manometrischer Flammenbilder gegründeten Klanganalysator[1]) ersonnen, mit dem jetzt einige Experimente angestellt werden sollen, indem wir in das Mundstück *a* (Fig. 148) verschiedene

[1]) Die Vorrichtung besteht im wesentlichen in der getheilten Kapsel *a* (Fig. 148), deren Theile durch eine feine Membrane von einander geschieden sind. In den vorderen Theil tritt Leuchtgas ein, das einem Brenner mit sehr kleiner runder Oeffnung zugeleitet und da entzündet wird. Es ist zweckmässig, die Flamme durch einen Glascylinder *c* gegen den Luftzug zu schützen, welchen die Rotationen des cubischen Spiegels *d* erzeugen. Der rückwärtige Theil des Cylinders steht mit einem Kautschukschlauche in Verbindung, welcher in ein Mundstück ausläuft, in das man sprechen oder singen kann, wodurch bestimmte Impulse auf die Membrane ausgeübt werden, die sich von dieser auf das Gas, und von hier auf die Flamme fortpflanzen, um das dem betreffenden Tone oder Vocale, oder der Verbindung beider entsprechende, vom rotirenden Spiegel wiedergegebene Flammenbild hervorzurufen.

Vocale entweder selbst hineinsprechen oder -singen, oder dasselbe mittelst eines Kautschukschlauches mit unserem künstlichen Stimmbandapparate (Fig. 147) in Verbindung bringen. Die hiebei auftretenden Flammenbilder, welche die Figur 149 für die fünf Hauptvocale und für die Töne F_0, c^0, f^0, c^1 darstellt, sind so charakteristisch, dass sie einen Tauben befähigen, aus ihnen sowohl den gesprochenen Vocal wie die Tonhöhe des Gesungenen ebenso bestimmt zu erkennen, wie aus dem Verhältnisse der Zacken zweier tönender Flammen das Intervall, welches sie bilden.

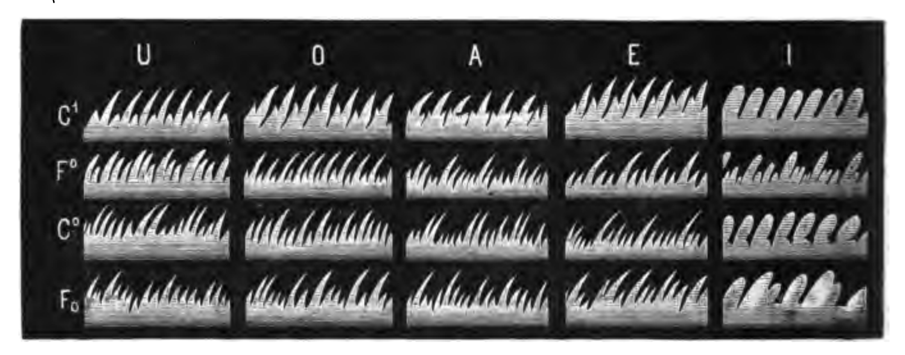


Fig. 149.

Was aber der experimentellen Analyse des menschlichen Stimmklanges sich allerdings vollständig entzieht, das ist die Seele, die aus dem vollendeten, von echter musikalischer Empfindung getragenen Kunstgesange einer schönen, warmen Stimme spricht. Allein dasjenige, was hier der Erforschung zugänglich war, und von uns an Einzelheiten erkannt wurde, ist immerhin geeignet, den Einblick in eine Reihe wunderbarer Processe zu gestatten, wodurch wir in den Stand gesetzt werden konnten, von den, das Entstehen und die Verwendung der menschlichen Stimme bedingenden physikalischen und physiologischen Vorgängen genügend entsprechende Vorstellungen zu erlangen.

20. Vortrag.

(Saiten. — Das Monochord. — Zählung der Schwingungen. — Grenzen der Tonwahrnehmung.)

Erinnern wir uns des hohen Ranges, welchen die Streichinstrumente in der Gemeinde des Orchesters, wie in der Kammermusik seit jeher behaupten, ein Rang, dessen Bedeutung mit dem Fundamente, dem Mauer- und Dachwerke eines Baues verglichen werden kann, während die Blasinstrumente das Ornament, die Farbe und den sonstigen Schmuck vorstellen; erinnern wir uns der mächtig dominirenden Stellung, zu welcher das Clavier es in der Musikwelt heute gebracht hat, sowie der verhältnissmässig ebenso grossen Verbreitung, welche die Laute, Mandoline und Guitarre in früheren Zeiten gefunden, ja letztere in südlichen Ländern noch heute geniesst; erinnern wir uns, dass die populärsten Instrumente fast aller Nationen, von der einsaitigen Guzla des Orientalen bis zur vielseitigen Zither des Aelplers, von der Balalaika des Russen bis zur Mandoline des Spaniers Saiteninstrumente sind, dass der Mythus den Anfang aller Musik von der Leier Apolls ableitet, während es geschichtlich feststeht, dass unsere heutige, so hoch ausgebildete Musikwissenschaft ihren Ausgang von einer Saite, der des Monochords, nahm und, wie wir später selbst erkennen werden, nur von dieser nehmen konnte, so wird man nicht umhin können, der Saite unter allen tönenden Körpern den ersten Platz einzuräumen,

Ihre Ueberlegenheit ergibt sich zunächst schon aus dem Umstande, dass wir mit einer einzigen Saite das ganze Tongebiet beherrschen können, indem wir mit ihr die Grenzen der hörbaren Töne nach Tiefe und Höhe zu erreichen und innerhalb derselben, d. i. zwischen 32- und (rund) 33.000 einfachen Schwingungen per Secunde (gleich 10 Octaven von Subcontra *C* an), alle denkbaren Tonhöhen darzustellen vermögen, — was mit keinem anderen tönenden Körper möglich ist. Ebenso überragt die Saite als Object für die Darstellung der wichtigsten Fundamentalerscheinungen der Akustik und Grundlehren der Musiktheorie jeden anderen tönenden Körper.

An ihr hat man gelernt, die Töne zu messen, die Intervalle zu bestimmen, deren Consonanz oder Dissonanz zu erkennen und zu begründen, die Gesetze der Schwingungen, das Verhältniss derselben zu der jeweiligen Länge, Spannung und Masse der Saite aufzufinden

und sonach die absolute wie relative Schwingungszahl der Töne mit grosser Genauigkeit zu bestimmen.

Das Instrument, dessen man sich zu allen solchen Untersuchungen von altersher bediente, und noch heute — allerdings in vervollkommneter Weise — am zweckmässigsten bedient, ist das Monochord (Fig. 150 *a*). Das Exemplar, welches Sie hier sehen, entspricht zwar dem Namen insofern nicht, als es kein »Einsaiter«, sondern mit vier Saiten, verschieden im Material wie in den Dimensionen, versehen ist. Im übrigen gehört es der vollkommeneren Gattung an, wenn es auch nicht an die Vollendung des Weber'schen, für mathematische Messungen bestimmten, für unsere Zwecke jedoch

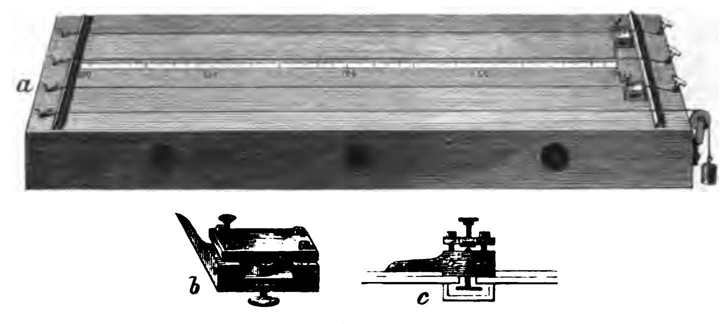


Fig. 150.

minder geeigneten Monochordes hinanreicht. Dieses hier ist mit einer dünnen Stahl- und einer gleichen Messingsaite, mit einer mit dickem Kupferdrahte übersponnenen starken Stahlsaite, endlich mit einer vierten Saite bezogen, welche letztere durch Gewichte gespannt wird, während zur Spannung der übrigen Wirbel dienen. Vermöge dieser seiner Mehrsaitigkeit wie seiner, zwei Meter betragenden, in Centimeter und Millimeter getheilten Länge, endlich vermöge der, eine scharfe Abgrenzung der Saiten, wie eine präcise, bis zu einem halben Millimeter reichende Messung ihrer Längen gestattenden Einrichtung der verschiebbaren Stege (Fig. 150 *b* und *c*), eignet sich unser Instrument zu einer hinlänglich genauen Darstellung aller einschlägigen Experimente.

Um nun unseren folgenden Versuchen volle Beweiskraft zu verleihen, ist es nothwendig, das Monochord genau auf Grund einer erwiesenen Schwingungszahl zu stimmen.

Die beiden mittleren Saiten sollen die Tonhöhe des $C_0 = 128$ Schw. bekommen, welche Tonhöhe wir erlangen, wenn wir den Steg auf 1177 Mm. (gleich der Saitenlänge des temperirten $A_0 = 217 \cdot 5$ Schwingungen), einstellen [1]), und nun die Saite mit der Normalgabel in Einklang bringen, wozu wir uns im vorliegenden Falle des vierten Theiltones bedienen. Auf solche Weise hinsichtlich der Richtigkeit ihrer Stimmung beglaubigt, dienen uns diese Saiten fortan mit hinlänglicher Verlässlichkeit zur Controle aller weiters zu ermittelnden Tonhöhen.

Wir wollen nun versuchen, die Errungenschaften, welche die Musik dem Monochorde, beziehungsweise der Saite zu verdanken hat, in der Weise und Reihenfolge kurz darzustellen, in welcher sie erfolgt sind.

Beginnen wir bei Pythagoras. Sinnend sehen wir ihn vor der gespannten Saite stehen. Von Terpander's Lyra her war es ihm bekannt, dass eine Saite, je straffer gespannt, um so höhere Töne gibt. Er kannte auch den Unterschied der Töne und hatte die Empfindung des mehreren oder minderen Wohlklanges ihrer Intervalle. Er wollte aber das Gesetz, den Grund dieses verschiedenen Verhaltens der Töne zu einander erforschen. Da mochte er denn zunächst versucht haben, die Abstände der Intervalle auf seinem Einsaiter durch Spannungsunterschiede darzustellen. Allein dafür fehlte ihm einestheils das absolute Kraftmass, andererseits musste er erfahren, dass mit wechselnder Spannung innerhalb der Widerstandsgrenzen der Saite sich doch nur wenige Töne darstellen liessen. Er fand, dass er seine Absicht, verschiedene Töne hervorzubringen, ebenfalls und viel bequemer, dann in viel grösserem Umfange erreiche, wenn er bei ungeänderter Spannung der Saite deren Länge nach Bedarf verkürzte, wozu ihm ein, zwischen den beiden Befestigungspunkten beweglicher Steg diente.

Er fand, dass die Abgrenzung der Saite auf eine bestimmte Länge stets denselben Ton gibt, und er hatte somit das Mittel gefunden, die jedem Tone entsprechende Seitenlänge zu bestimmen. Diese Versuche, die er nun auch bei wechselnden Spannungen der Saite wiederholt haben mochte, führten ihn zur Erkenntniss, dass die

---

[1]) $\dfrac{C_0 = 128 \times 2000\,\text{Mm.}}{A_0 = 217 \cdot 5} = 1177$ Mm.

Verhältnisse der Töne zu einander dieselben bleiben, welche Spannung die Saite auch haben möge.

Als er nun den Steg genau unter die Hälfte der Saite brachte, so erzielte er einen Ton, der mit dem Tone der ganzen Saite jenes Intervall ergab, welches wir Octave nennen. Das von uns Quinte genannte Intervall erschien, wenn er die Saitenlänge in drei Theile theilte und mit dem Stege zwei dieser Theile abgrenzte. Es ergab sich hernach für die Octave das Zahlenverhältniss von 1 : 2, für die Quinte von 2 : 3. Auf diese Weise fand er die Saitenlängen, beziehungsweise Verhältnisszahlen für alle Intervalle der diatonischen Tonleiter, auf deren Bildung wir seinerzeit bei Betrachtung der Tonsysteme zurückkommen werden.

Dass die Saite Schwingungen macht, wenn sie tönt, mithin schwingen müsse, um zu tönen, konnte von Pythagoras allerdings nicht unbeachtet geblieben sein; um aber zur Erkenntniss zu gelangen, dass die Tonhöhe ihren Grund in der Zahl der Schwingungen habe, d. h. dass je schnellere Schwingungen, desto höhere Töne entstehen, dazu mussten weitere 2200 Jahre vergehen, nämlich bis zum Zeitalter Mersenne's, dem es vorbehalten war, die Schwingungszahl als das Bestimmende der Tonhöhe nachzuweisen. —

Besehen wir uns nun die wesentlichsten Experimente Mersenne's und die Ergebnisse, zu welchen sie führten.

Denken wir uns eine Saite von so beträchtlicher Länge und einer solchen Spannung, dass, wenn die Saite ihrer ganzen Länge nach schwingt, diese Schwingungen gezählt werden können, indem man sie entweder mit dem Auge, oder, wenn die raschere Aufeinanderfolge der Schwingungen dies nicht mehr gestattet, mit dem Ohre etwa in der Art verfolgt, dass man die Saite gegen einen Streifen Papier schlagen lässt.

Dieses Behelfes, sowie auch anderer, zum gleichen Ziele führender Methoden, werden wir uns sogleich selbst bedienen. Man verfertigt den Streifen am besten aus leichtem Carton, ungefähr 20 Centimeter lang und 2 Centimeter breit, befestigt ihn in senkrecht hängender Lage an ein Stativ (Fig. 151), um ihm so jede beliebige Stellung zur Saite geben zu können.

Wir bedürfen jetzt nur noch eines Chronographen, der die Minuten in 300 Theile theilt, und dessen arretirbarer Zeiger ge-

stattet, $^1/_5$ Secunde abzumessen, um das Experiment mit grosser Genauigkeit ausführen zu können. Hier sehen Sie einen solchen Zeitmesser.

Nehmen wir an, wir hätten 60 Schwingungen in der Weise gezählt, dass wir bei »0« den Zeiger auslösten, und bei »60« arretirten, und wir finden, dass wir hiezu 30 Secunden gebraucht haben, so erfolgten offenbar in einer Secunde zwei Schwingungen, und wir haben damit die Zahl und die Dauer der Schwingungen dieser Saitenlänge genau bestimmt.

Wenn wir nun die Saite in ihrer Mitte abgrenzen, das abgegrenzte Stück in Schwingungen versetzen, und die zu 60 Schwingungen erforderliche Zeit in voriger Weise mit der Uhr abmessen, so zeigt sich, dass wir dazu 15 Secunden gebraucht haben.

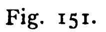
Und so werden wir, das Experiment weiter ausführend, finden, dass die 60 Schwingungen der auf $^1/_3$ verkürzten Saite 10, und der auf $^1/_4$ verkürzten $7\,^1/_2$ Secunden erheischen.

Es entfallen also auf eine Secunde im ersten Falle, d. h. bei ganzer Saitenlänge, zwei Schwingungen;

im zweiten Falle, d. h. bei halber Saitenlänge, vier Schwingungen;

im dritten Falle, d. h. bei einem Drittel der Saitenlänge, sechs Schwingungen, und

im vierten Falle, d. h. bei einem Viertel der Saitenlänge, acht Schwingungen.


Fig. 151.

Vergleichen wir die Producte aus den Längen der untersuchten Saitenstrecken mit den Schwingungszahlen, so stellt sich Folgendes heraus:

L Saitenlänge	N Schwingungen		x Product
$^1/_1$	2	=	2
$^1/_2$	4	=	2
$^1/_3$	6	=	2
$^1/_4$	8	=	2

Damit war nicht nur das, im Allgemeinen schon aus den Schwingungen des Gummischlauches gefolgerte, im dritten Vortrage entwickelte wichtige Gesetz gefunden, »dass die Schwingungszahlen einer Saite — falls nur ihre Längen sich ändern — sich umgekehrt verhalten, wie die Längen der Saite«, oder was dasselbe besagt, »dass die Producte aus den Schwingungszahlen und den Saitenlängen eine constante Zahl bilden« — sondern es war auch das Mittel gegeben, die absolute, und demnach selbstverständlich auch die relative Schwingungszahl eines jeden Tones zu bestimmen.

Versuchen wir, das soeben theoretisch dargelegte Experiment an unserem Monochorde praktisch auszuführen. Wir bedienen uns der übersponnenen Saite, deren Schwere auch auf der relativ kurzen Strecke von zwei Metern die Darstellung zählbarer Schwingungen gestattet. Wir geben der Saite eine solche Spannung, dass sie in der Secunde genau achtmal an den Cartonstreifen (Fig. 151) anschlägt, mithin 16 einfache Schwingungen vollführt, und wollen uns als Zeitmesser eines, mit unserem Secundenpendel verbundenen elektro-magnetischen Zählers bedienen. Eine noch bessere Beobachtung gestattet in Folge der längeren Constanz der Amplituden und demnach leichteren Zählbarkeit der Schwingungsstösse eine andere, zum gleichen Ziele führende Methode. Sie besteht darin, dass man mit langsamem Bogenstrich über die Saite fährt, und sie dadurch nöthigt, sich im Tempo ihrer Eigenschwingung von dem Haarbande loszureissen.

Da schon Pythagoras gefunden hatte, dass die halbe Länge einer Saite ihre Octave gibt, wovon wir uns bereits überzeugten, so wird unsere Saite, wenn wir sie nun durch Abgrenzung mittels des beweglichen Steges um die Hälfte verkürzen, nach dem von Mersenne entdeckten und nachgewiesenen Gesetze die doppelte Zahl von Schwingungen, mithin 32 in der Secunde vollführen.

Während wir bei den Schwingungen der ganzen Saite nur ein Geräusch, aber keinen Ton vernahmen, glauben wir von den 32 Schwingungen der halben Saite bereits eine einigermassen bestimmte Tonempfindung zu haben, eine Vermuthung, in der uns der Ton von 64 Schwingungen der Viertelsaite noch mehr bestärkt, und die zur vollen Gewissheit wird, wenn wir die Saite auf ein Achtel der ganzen Länge, d. h. auf 25 Centimeter verkürzen, indem wir den Steg auf diese Ziffer der Monochordscala einstellen, und damit einen Ton von

128 Schwingungen erzeugen, in welchem wir sofort das sogenannte grosse oder achtfüssige *C* (wie es die tiefste Saite des Violoncells angibt) erkennen, was auch der Einklang mit der nach der Gabel gestimmten Saite unseres Monochords bestätigt. Eine, dieses Resultat weiters bestätigende Probe, wiewohl es deren kaum noch bedürfte, können wir mit der Sirene anstellen, indem wir sie auf denselben oder auf einen um eine oder mehrere Octaven höheren Ton bringen, und dann mittelst ihres Zählwerkes die Zahl ihrer Schwingungen ermitteln.

Man bedient sich hiezu am zweckmässigsten der automatischen Sirene von Caignard, deren Einrichtung ich Ihnen damals, als wir sie im Wasser singen liessen (Fig. 100), ausführlich erklärte.

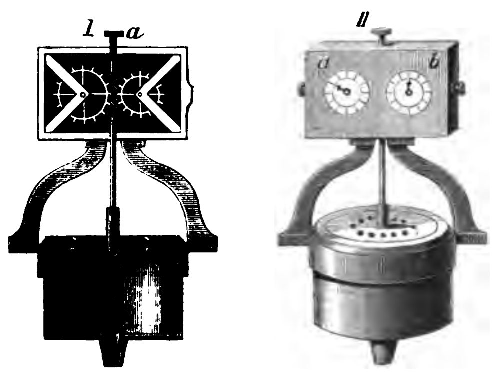


Fig. 152.

Hier habe ich nur noch die Erklärung des Zählwerkes nachzutragen, welches Sie an diesem Exemplare sehen und das den Zweck hat, die Zahl der Touren der Scheibe zu markiren. Die an der Achse der Scheibe befindliche, sogenannte Schraube ohne Ende (Fig. 152 I *a*) greift in ein Zahnrad, dessen Zeiger bei jeder Tour der Sirenenscheibe an einem 100 theiligen Zifferblatte II *a* um einen Grad weiterrückt. Jeder volle Zeigerumgang wird durch das Fortrücken des Zeigers auf dem Zifferblatte II *b* ersichtlich gemacht. Das Zählwerk lässt sich durch Ein- und Ausrücken in einem beliebigen Momente in oder ausser Gang setzen. Hat nun die Sirene die gewünschte Tonhöhe erreicht, so setzt man das Zählwerk in Gang, und misst die Dauer seines Fungirens an einem Secundenpendel oder Chronographen. Unsere Sirenenscheibe hat 25 Löcher; eine Umdrehung derselben und folglich jeder Grad, um welchen der Zeiger am ersten Zifferblatte vorrückt, ist gleich 50 einfachen Schwingungen. Ein voller Umgang dieses Zeigers, mithin auch jeder Grad, um welchen der zweite Zeiger vorrückt, bedeutet also 5000 Schwingungen.

Es können demnach ohne Unterbrechung bis zum vollen Umgange des zweiten Zeigers, dessen Zifferblatt in 30 Theile getheilt ist, 150.000 Schwingungen gezählt werden.

Lassen wir jetzt unsere Sirene einlaufen, bis sie mit dem grossen *C* unseres Monochordes in der zweigestrichenen Octave übereinstimmt.

Setzen wir das Zählwerk mit der Secunde in Thätigkeit, erhalten wir es durch 10 Secunden im Gange, und lesen das, mit der vollendeten zehnten Secunde arretirte Zählwerk ab.

Ist es uns gelungen, während dieser Zeit die Tonhöhe der Sirene constant zu erhalten, und haben wir richtig manipulirt und gezählt, so werden wir finden, dass der zweite Zeiger um zwei und der erste um fünf Grade vorgerückt ist. Die Sirene hat also in 10 Secunden $(2 \times 5000) + (5 \times 50) = 10.250$, und sonach in einer Secunde 1025 Schwingungen gemacht. Theilen wir diese Zahl durch acht, weil ja die Sirene die dritte Octave des Monochordtones angab, so erhalten wir für letzteren die Zahl von $128^1/_8$ Schwingungen, ein Resultat, welches durch seine fast völlige Uebereinstimmung mit der, durch directe Zählung der Schwingungen der Saite erhaltenen Zahl die Richtigkeit der von Mersenne gefundenen Gesetze constatirt.

Da wir also, wie sich gezeigt hat, auf diesem Wege die genaue Schwingungszahl eines Tones zu bestimmen vermochten, so sind wir in gleicher Weise im Stande, die Schwingungszahlen eines jeden andern Tones aus seiner Saitenlänge abzuleiten, und wir besitzen damit eine der einfachsten und für praktische Zwecke hinlänglich genauen Methoden zur Bestimmung der absoluten Schwingungszahl.

Diesem Experimente verdanken wir aber noch ein weiteres wichtiges Ergebniss, nämlich die Erkenntniss der unteren Grenze der Tonwahrnehmung, und die Möglichkeit, dieselbe in Zahlen auszudrücken. Wiewohl diese Grenze, und ebenso auch die obere, für verschiedene Menschen nicht dieselbe ist, so kann doch im Allgemeinen angenommen werden, dass Töne von weniger als 32 einfachen Schwingungen sich kaum mehr musikalisch bestimmen lassen und daher auch zu musikalischer Verwendung nicht mehr geeignet sind. Man wird also das sogenannte 32füssige oder Sub-Contra C_2, welches durch 32 einfache Schwingungen entsteht, als die unterste Grenze der musikalisch brauchbaren Töne bezeichnen dürfen. Wenn

man das 32füssige C unseres Monochordes entweder mit Hörstab und Hörscheibe, oder mittelst eines, in eine der Oeffnungen des Monochordes (die übrigen müssen verschlossen sein) eingeführten Schlauches belauscht, so erhält man den Eindruck eines blossen Gedröhnes. Ueberzeugen Sie sich selbst davon. Die obere Grenze der Tonwahrnehmung (und da wir schon bei der Betrachtung dieses Gegenstandes sind, so soll er auch hier zum völligen Austrag gelangen) ist noch viel schwankender. Savart fand, dass ein Ton von 30.000 Schwingungen von vielen, einer von 33.000 Schwingungen aber schon nur von sehr wenig Personen gehört wurde.[1] Töne von mehr als 16.000 Schwingungen sind nicht mehr unterscheidbar. Die Zahl der musikalisch brauchbaren Töne erstreckt sich also auf neun Octaven (von C_2 mit 32 bis h^5 mit 15360 Schwingungen[2]) und von diesen Tönen können die, in die beiden äussersten Octaven fallenden grösstentheils nur in Verbindung mit anderen Tönen noch zu einer eigentlichen musikalischen Wirkung gebracht werden. Grosse Orgeln umfassen nahezu alle neun Octaven. Der Umfang der menschlichen Stimme reicht von 120 (H_1 contra) bis $2931^2/_3$ (f^3), jener der Violine von 384 (g^0) bis 8192 (c^5), des modernen Claviers von $53^1/_3$ (A_2) gleichfalls bis 8192 (c^5) — alles nach der physikalischen Stimmung gerechnet, die ihr C von der Potenz von 2 herleitet, und worüber später ausführlicher gesprochen werden soll.

21. Vortrag.

(Saiten, Fortsetzung. — Theiltöne.)

Verfolgen wir die mittelst des Monochordes gemachten Entdeckungen weiter. Mersenne hatte den klugen Einfall, sich nicht auf die Wahrnehmungen allein zu beschränken, zu welchen die mittelst eines Wirbels gespannte Saite ihn geführt hatten, sondern, an die Versuche des Pythagoras anknüpfend, auch jenen Ergebnissen nachzugehen, die ihm seine Saite bei deren Spannung durch Gewichte liefern würde.

---

[1]) Die obere Hörgrenze reicht nach Savart bis 96.000, nach Preyer bis 80.000, nach Despretz bis 73.000, nach A. Handl (Physik S. 148) bis 72.000 einfache Schwingungen.

[2]) $c^6 = 16384$ Schwingungen.

Da er durch Vermehrung des Gewichtes höhere Töne erlangte, so kam ihm der Gedanke, zu ermitteln, in welchem Verhältnisse das spannende Gewicht zur Schwingungszahl derselben Saite steht, und er fand durch ein sehr einfaches Experiment, welches wir sogleich durchführen können, dass, wenn er das Gewicht vervierfachte, die Schwingungszahl sich verdoppelte, dass sie sich verdreifachte, sobald er neunmal, und vervierfachte, wenn er 16mal soviel Gewichte anwendete, — und damit war das zweite für die Schwingungen der Saiten so wichtige Fundamentalgesetz gefunden, wonach die Schwingungszahlen im geraden Verhältnisse zur Quadratwurzel aus der Spannung stehen, oder, was dasselbe ist, dass, wenn die Schwingungszahlen einer Saite, falls nur ihre Spannungen geändert werden, wie die Zahlen 1, 2, 3 u. s. w. wachsen oder abnehmen sollen, die Spannungen den Quadraten dieser Zahlen entsprechen müssen.

Wir wollen diesen Versuch erst mittels Rechnung, und hierauf praktisch ausführen, und zwar für Grundton, Terz, Quinte und Octave, oder auch für jeden anderen beliebigen Ton.

Die Belastungen für die mathematische diatonische Tonleiter berechnen sich, wenn 1 = 500 Gramm ($^1/_2$ Kilo) ist, wie folgt:

					Gramm
C	1	. . . . . .		=	500
D	$^9/_8$	. $^9/_8$	= $^{81}/_{64}$	=	632·8
E	$^5/_4$	. $^5/_4$	= $^{25}/_{16}$	=	781·2
F	$^4/_3$	. $^4/_3$	= $^{16}/_9$	=	888·8
G	$^3/_2$	. $^3/_2$	= $^9/_4$	=	1125·0
A	$^5/_3$	. $^5/_3$	= $^{25}/_9$	=	1388·9
H	$^{15}/_8$	. $^{15}/_8$	= $^{225}/_{64}$	=	1757·8
C	2	. 2	= 4	=	2000

Nebenbei bemerkt ist durch dieses Experiment zugleich die von manchem Musikhistoriker gläubig nacherzählte Fabel, wonach Pythagoras durch Verdoppelung des spannenden Gewichtes die Octave, und mittelst ähnlicher Gewichtsverhältnisse die übrigen Intervalle hervorgebracht hätte, in das Fabelreich verwiesen.

Ein für die Praxis noch viel belangreicheres Gesetz ist dasjenige, wonach bei gleicher Länge, gleicher Spannung und gleichem Material, die Schwingungszahl umgekehrt mit der Dicke der Saite

sich ändert. Von zwei Saiten also, deren eine noch einmal so dick ist, wird in diesem Falle die dickere noch einmal so langsam schwingen, als die dünnere. Dieselbe Bedeutung für den Bau und Bezug von Saiteninstrumenten hat das weitere, ebenfalls mittelst des Monochordes gefundene Gesetz, demzufolge bei gleicher Länge, Spannung und Dicke, jedoch verschiedenem Material der Saiten, die minder dicke, oder, was dasselbe ist, die minder schwere schneller schwingt als die schwerere und zwar im umgekehrten Verhältnisse zur Quadratwurzel des Gewichtes der Saite. Macht man den Versuch beispielsweise mit zwei gleich langen, gleich dicken und gleich gespannten Saiten, deren eine aus Messing, die andere aus dem beiläufig viermal schwereren Platin besteht, so wird man finden, dass die Messingsaite noch einmal so schnell schwingt, als jene aus Platin. Bestände die Saite aus einem Material, das neunmal so leicht ist als Platin, so würde sie dreimal so schnell schwingen als die Platinsaite.

Die angedeutete praktische Wichtigkeit dieser beiden letzten Gesetze wird sofort erkannt werden, wenn wir beispielsweise an die Violine oder an das Clavier denken. Sollten für erstere nur gleich dicke und gleich gespannte Saiten verwendet werden, so müsste die *A*-Saite gegenüber der *E*-Saite in dem Verhältnisse von 3 : 2, zur *D*-Saite in jenem von $^3/_2 \cdot ^3/_2 = ^9/_4$ und zur *G*-Saite gar von $^9/_4 \cdot ^3/_2 = ^{27}/_8$, sonach um nahezu das $3^1/_2$fache verlängert werden. Ganz abgesehen von seiner Unspielbarkeit würde ein solches Monstrum Alles sein, nur keine Violine.

Man wählt daher für die tieferen Quinten zunehmend dickere Saiten, damit sie bei gleicher Länge und Spannung langsamere Schwingungen machen; denn, wollte man die tieferen Quinten mit Saiten von gleicher Länge und Dicke hervorbringen, so müsste man ihre Spannung bis zur Tonlosigkeit vermindern. Wir können uns hievon sofort überzeugen, wenn wir diese mit vier gleichen (*e*-)Saiten bezogene Violine quintenweise stimmen.

Die der *G*-Saite im Verhältnisse zur *D*-Saite mangelnde Dicke wird durch das Gewicht des Kupferdrahtes, womit sie übersponnen ist, weitaus ersetzt.

Ein gleiches Vorgehen wird bei der Herstellung von Claviersaiten für tiefe Töne beobachtet, um bei nicht übermässiger Länge langsame und doch kräftige Schwingungen zu erzielen. Man wählt

vom Discant gegen den Bass zunehmend dickere Saiten, und überspinnt die der tiefsten Töne mit dickerem Kupfer-, Messing- oder Eisendraht.

Der Vollständigkeit willen sei hier der Methode von Brook Taylor gedacht, nach welcher sich die Schwingungszahl einer Saite ohne Beihilfe des Ohres bestimmen lässt. So geistvoll das Problem und seine Lösung, so ist die Methode infolge der vielen Factoren, wie Länge, Dicke, Spannung, specifische Schwere, Beschleunigung und Elasticität, die dabei zu berücksichtigen sind, von anderen, sowohl verlässlicheren, als einfacheren Bestimmungsarten längst überholt worden.

Mehr hierüber im Anhange. —

In Bezug auf das vierte der zuvor behandelten Schwingungsgesetze, wonach die verschiedenen Massen sonst gleicher Saiten sich wie die Quadrate ihrer Schwingungszahlen verhalten, wäre endlich noch zu bemerken, dass es mit Hilfe desselben möglich ist, die specifische Dichtigkeit aller Körper, welche in Fadenform gebracht und gespannt werden können, insbesondere der Metalle, lediglich durch ihre relative Tonhöhe zu ermitteln. —

Setzen wir die Versuche über die Schwingungen der Saite an unserem Monochorde fort. Die bisherigen haben uns gelehrt, dass Saiten, je nach den von uns willkürlich an ihnen sowohl in Bezug auf Länge, Spannung, Dicke, wie auf Schwere vorgenommenen Aenderungen, verschieden hohe Töne geben, und es hat uns das Monochord in den Stand gesetzt, aus diesen Elementen die absoluten wie die relativen Schwingungszahlen der Töne abzuleiten.

Wenn wir bei unseren Untersuchungen kürzere oder längere Strecken unserer Saite abgrenzten, und diese in Schwingungen versetzten, so zeigten die Schwingungen selbst stets nur eine und dieselbe Gestalt, denn wir konnten bemerken, dass in jedem Falle die Saite ihrer ganzen Länge nach schwang, so zwar, dass in der Mitte die grösste Elongation, an den Befestigungspunkten aber gar keine Bewegung stattfand.

Nun erinnern wir uns aber an die verschiedenen Schwingungsarten, die wir mit der Drahtspirale und dem Melde'schen Vibrationsapparate hervorbrachten, und wollen jetzt versuchen, ob sich unsere

Saite ebenfalls eignet, Theilschwingungen zu vollführen, und welche Folgen sich daraus ergeben.

Grenzen wir versuchsweise die Saite in ihrer Mitte ab. Jedoch anstatt unseren beweglichen Steg auf Nr. 100 der Centimeterscala einzustellen, wollen wir die Saite an diesem Punkte leise, sei es mit dem Finger, mit einem Stückchen weichen Filzes, mit einem Federbart, oder mit einem Filzstäbchen berühren und zugleich in Schwingung versetzen. Aus der Höhe des, durch dieses Verfahren hervorgerufenen Tones erkennen wir in ihm sofort die Octave des Grundtones; wir hören, dass die Klangfarbe eine verschiedene ist von jener, welche dieser Ton hatte, als er durch die feste Abgrenzung mittels des Steges erzeugt wurde; wir sehen, dass sich an der Berührungsstelle ein eben solcher Punkt absoluter Bewegungslosigkeit bildet, wie an den beiden Enden, wo die Saite aufliegt, was sich mittels sogenannter Reiter (etwa vier Centimeter langer, in der Mitte umgebogener, schmaler Papierstreifchen) sofort nachweisen lässt, die auf dem Knotenpunkte ruhig verharren, während sie an jeder anderen Stelle abgeworfen werden.

Wir sehen weiters, dass die grösste Elongation (Ausbiegung) in beiden Vierteln der ganzen Saite, nämlich bei 50 und 150 unserer Monochordtheilung stattfindet; wir können endlich, ist nur die Saite hinreichend lang und schwer, um ebenso langsame Oscillationen auszuführen, wie unsere Drahtspirale — ebenso wie bei dieser beobachten, dass die beiden Hälften unserer Saiten in entgegengesetzter Richtung schwingen, und wir sind nun vollkommen in der Lage, das Phänomen dahin zu erklären, dass sich die Saite in zwei gleiche stehende Wellen zerlegt hat, was sich übrigens an der übersponnenen Saite unseres Monochordes, allerdings bei scharfer Aufmerksamkeit, recht wohl beobachten lässt.

Wir wollen nun die Resultate, die wir auf dem Wege der natürlichen Zerlegung der Schwingung unserer Saite in Theilschwingungen finden werden, durch Notenzeichen und entsprechende Zahlen im Auge behalten.

Bezeichnen wir den Grundton, als den ersten Ton, mit 1 und die folgenden mit ihren Ordnungszahlen, so werden wir [Note] = 1 setzen.

Es interessirt uns nun zu erfahren, ob wir in gleicher Weise einen Ton hervorrufen können, der zwar höher als der Grundton, aber tiefer als die Octave klingt. Erhalten wir unsere Saite durch Bogenstriche in dauernder Schwingung und fahren wir ihrer Länge nach mit dem Filzstäbchen oder dem Federbarte langsam über dieselbe hin. Es ist vergebens; ein tieferer Ton als die Octave war nicht zu erzielen, dagegen hörten wir höhere in grosser Menge und Verschiedenheit. Wir haben mithin gefunden, dass die nächste natürliche Theilung der Saite, die sie gleichsam selbst besorgt, die Octave bildet, die zum Grundton im Verhältniss, und zwar bezüglich der Saitenlängen wie 1 : 2 und bezüglich der Schwingungszahl wie 2 : 1 steht, und dass ein tieferer Ton solcherart nicht hervorgebracht werden kann. Es liegt also kein Naturton zwischen Grundton und Octave, der höher als jener und tiefer als dieser wäre. Wir notiren daher als den zweiten Ton die Octave [Notenbeispiel] = 2.

Suchen wir den der Octave nächstfolgenden höheren Ton. Es ist die Quinte der Octave oder die Duodecime des Grundtones. Welche Erscheinungen begleiten diesen Ton?

Zunächst bemerken wir, dass wir die Saite an dem auf der Monochordscala mit 133·35 bezeichneten Punkte gedämpft haben. Wir können die Saite aber auch bei 66·65 dämpfen und erzielen dasselbe Resultat, denn da sich die Saite, wie Sie sehen, in drei stehende Wellen zerlegt hat, so ist es gleichgiltig, ob wir das obere oder untere Drittel der Saitenlänge berühren, da auf beiden Punkten Stellen der Unbeweglichheit, die wir fortan als Knotenpunkte bezeichnen wollen, entstehen, während die Elongationen oder die sogenannten Schwingungsbäuche dazwischen liegen. Dass eine jede dieser drei Abtheilungen für sich genau denselben Ton hören lässt, kann leicht nachgewiesen werden, denn man braucht blos unter die beiden Knotenpunkte Stege zu setzen und jede Abtheilung für sich erklingen zu machen, um sich zu überzeugen, dass die Töne unter sich völlig gleich sind. Wir notiren diesen Ton ebenfalls und versehen ihn mit seiner Ordnungszahl [Notenbeispiel] = 3.
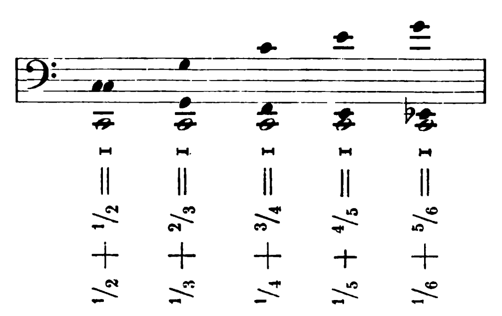
Den nächstfolgenden Ton erkennen wir als die Doppeloctave des Grundtones und werden folgerichtig schliessen, dass die Saite

in doppelt so viele schwingende Abtheilungen zerfallen sein müsse, als die Octave hatte. Dass wir es hier in der That mit vier schwingenden Theilen zu thun haben, die zwischen drei Knotenpunkten oscilliren, lässt sich einfach durch Reiter nachweisen. Wir können zur Hervorrufung dieser Schwingungsform die Saite entweder beim Punkt 50 oder 150, nämlich im ersten und dritten Vierttheil ihrer Länge dämpfen, keineswegs aber bei 100 (dem zweiten Vierttheil), weil sich da die Saite sofort nur in zwei Theile zerlegen würde. Versehen wir die Punkte 50, 100, 150 mit *weissen* Reitern und setzen wir genau dazwischen *rothe* Reiter, so werden letztere beim Erklingen der *Doppeloctave* abgeworfen, die weissen dagegen auf den Knotenpunkten verharren. Die Ordnungszahl dieses Tones wird 4 sein.

Durch Untersetzen von drei Stegen in $^1/_4$, $^2/_4$, $^3/_4$ der Saite beweisen wir die Gleichheit der Tonhöhen jeder der vier Abtheilungen.

Unterbrechen wir jetzt ein wenig den weiteren Verfolg unserer Versuche, um einige wichtige ergänzende Bemerkungen einzuschalten.

Wenn wir die Saite an den Stellen, wo wir die Knotenpunkte ihrer natürlichen Theilung gefunden haben (soweit wir sie bisher verfolgt hatten, oder noch weiter verfolgen wollen), durch *feste Stege* abgrenzen, und die Töne der *vor* oder *hinter* dem Stege befindlichen Saitenlängen mit einander vergleichen, so finden wir stets, dass die Summe der Schwingungsverhältnisse beider Töne die Verhältnisszahl des *Grundtones* = 1 ergibt, wie dies aus folgendem Schema hervorgeht, das wir auf seine Gesetzmässigkeit experimentell einigen Proben unterziehen wollen.



Ein weiterer Punkt, den ich hier einschaltungsweise erläuternd berühren möchte, betrifft den Hinweis auf die volle Ueberein-

stimmung der Behandlung des sogenannten Flageolettspiels auf Streichinstrumenten, und speciell auf der Violine, mit dem zuvor entwickelten Gesetze der natürlichen Partialschwingungen einer Saite.

Der tiefste Flageolettton, der durch Berührung der g^0-Saite in ihrer Mitte auf der Geige hervorgebracht werden kann, ist die Octave: das g^1; der nächste die Duodecime: das d^2, welches man entweder durch Halbirung der d^1-Saite als deren Octave, oder auch dadurch hervorrufen kann, dass man auf der g-Saite bis zur Quinte der Octave $= d^2$ fortschreitet. Man erzielt aber dieses d^2 ebenfalls, wenn man den Ton d^1 auf der g-Saite flageolettirt; denn die Stelle dieses d^1 grenzt genau ein Dritttheil der ganzen Saitenlänge ab und es ist für die Wirkung gleichgiltig, welcher der beiden, die Saite in drei Theile theilenden Knotenpunkte berührt wird. — Die Töne zwischen g^1 und d^2 sind als Flageoletttöne nicht darstellbar, wenigstens nicht durch einen Spieler, weil dazu zwischen dem greifenden und flageolettirenden Finger auf derselben (g) Saite die Spannweite einer Octave erforderlich wäre.

Die dem d^2 folgenden Töne (dis^2, e^2, f^2, fis^2) können — die hinlängliche Länge der Finger vorausgesetzt — durch Quintengriffe auf der g-Saite hervorgebracht werden. Das g^2 und die demselben folgenden Töne werden bekanntlich durch den Quartengriff erzeugt. Sie bilden die Doppeloctave des jeweilig gegriffenen Grundtones, während der leise gleitende (4.) Finger den Knotenpunkt im ersten Vierttheil der jeweiligen Saitenlänge berührt und dadurch die Zerlegung der Saite in vier schwingende Theile bewirkt, da es nach dem am Monochorde erwiesenen Gesetze völlig gleich ist, ob man in diesem Falle die Saite im ersten oder dritten Vierttheile ihrer Länge dämpft, wovon man sich auch auf der Geige leicht überzeugen kann.

Dass Alles dieses auch auf die übrigen Streichinstrumente Anwendung findet, versteht sich von selbst.

Das sogenannte Flautato wird hervorgebracht, wenn die Saite stärker als beim Flageolett, jedoch nicht so weit niedergedrückt wird, dass sie das Griffbrett berührt. Der Bogen muss leicht und nahe dem Griffbrette geführt werden.

Das auf diese Art hervorgerufene Intervall wird die Octave des Tones sein, der beim völligen Niederdrücken der Saite erscheinen

würde. Es können aber auch höhere Obertöne hervorgebracht werden, wenn die Bogenführung rascher und näher dem Stege erfolgt. Die Hervorrufung des Obertones erfolgt in diesem Falle durch den Bogenstrich selbst. Die schwingende Saite aber bildet sich die zum Ertönen erforderliche feste Abgrenzung, die ihr der lockere Fingerdruck nicht gewährt, mittelst des Knotenpunktes jenes Obertones, dessen Schwingungsbauch vom Bogenstriche getroffen wird.

Wir kehren jetzt wieder zu unserem unterbrochenen Gegenstande zurück.

Mögen wir die zuvor bis zum vierten Obertone ausgeführte Procedur der natürlichen Saitentheilung so weit fortsetzen als wir nur wollen, so werden wir erkennen, dass jeder nächst höhere, auf diese Weise hervorgerufene Ton gegen den vorhergegangenen einen Bauch und einen Schwingungsknoten mehr hat, dass also die Saite zunehmend in immer mehr schwingende gleiche Theile sich zerlegt. — Da nun gleiche Saitenlängen unter sonst gleichen Umständen gleiche Schwingungszahlen haben, die einzelnen Abtheilungen einer in solcher Art schwingenden Saite aber, wie wir uns überzeugten, unter sich vollkommen gleich sind, so wird eine Saite, in je kleineren Abtheilungen sie schwingt, nothwendig immere höhere Töne geben müssen.

Zwischen diesen Partial- oder Theilschwingungen, deren Töne Theil- (Aliquot-) oder Obertöne genannt werden, letzteres, weil sie insgesammt über dem Grundtone liegen — zwischen diesen Theiltönen also und ihrem Grundtone ergeben sich nun folgende Verhältnisse, wobei wir den Grundton den ersten, den nächstfolgenden Theilton den zweiten, den nächsten den dritten u. s. w. nennen und mit der betreffenden Ordnungszahl bezeichnen wollen.

Theilton	Knoten	Schwingende Theile (Bäuche)	Schwingungen
1. (Grundton)	0	1	N
2.	1	2	2 N
3.	2	3	3 N
4.	3	4	4 N
5.	4	5	5 N
:	:	:	:
:	:	:	:
m	$m - 1$	m	mN

Aus dieser Uebersicht ergibt sich:

1. dass die Zahl der Knoten stets um einen weniger beträgt, als die Ordnungszahl des betreffenden Theiltones, wobei die beiden Befestigungspunkte der Saite nicht in Betracht kommen; denn, wollte man sie ebenfalls als Knotenpunkte, d. h. als Punkte der Ruhe zählen, so müsste die Knotenzahl, statt um eins vermindert, um eins erhöht werden;

2. dass die Zahl der schwingenden Theile oder Bäuche gleich ist der Ordnungszahl des betreffenden Theiltones; endlich

3. dass die Schwingungszahl sich beim zweiten Theiltone verdoppelt, beim dritten verdreifacht, beim vierten vervierfacht u. s. w., so dass, wenn der erste (der Grundton) beispielsweise 200 Schwingungen macht, der zweite Ton zweimal 200 = 400, der dritte dreimal 200 = 600, der vierte viermal 200 = 800 Schwingungen in derselben Zeit machen wird.

Es befolgen sonach die Schwingungszahlen der Theiltöne das Gesetz der natürlichen Zahlen 1, 2, 3 . . . . . , ein überaus merkwürdiges, weil nur in der Akustik und sonst bei keiner Erscheinung der physischen Welt vorkommendes reines Naturgesetz, — denn die Natur selbst ruft, ohne dass es hiebei irgend einer künstlichen Beithat bedürfte, diese Schwingungen durch den alleinigen Impuls der Luft hervor, wie dies an der Aeolsharfe, an Telegraphendrähten und an, von Röhren umschlossenen Luftsäulen beobachtet werden kann.

Es gibt noch einige interessante Methoden, die von William Noble zu Oxfort um 1674 entdeckten Partialschwingungen einer Saite durch die Schwingungen eines zweiten oscillirenden Körpers einzuleiten.

Die beiden folgenden Methoden haben Melde zum Urheber. Bei der einen bedient man sich einer Stimmgabel, deren eine Zinke mit einem Stückchen Filz versehen ist. Hält man die tönend gemachte und mit einem der Obertöne der Saite im Einklange stehende Gabel an passender Stelle leise an die Saite, so wird die Saite den betreffenden Ton selbstständig und rein hören, und alle sonstigen die Bildung der Obertöne begleitenden Erscheinungen wahrnehmen lassen.

Selbstverständlich wird diese Stelle die Mitte der betreffenden Abtheilung sein; denn es kann kein Ton erscheinen, wenn wir mit

der Gabel die Saite bei dem Knotenpunkte des, der Gabel entsprechenden Tones berühren.

Es lassen sich auf diese Weise auch mehrere Obertöne durch entsprechende Gabeln gleichzeitig zum Erklingen bringen, und mittelst der, mit Hörscheiben versehenen Stäbe gut wahrnehmen.

Die zweite Methode beruht auf der Uebertragung der Transversalschwingungen des Haarbandes eines Geigenbogens auf die Saite. Ist die Schwingungszahl der abgegrenzten Haarbandlänge[1]) mit einem der Obertöne der Saite im Einklange, so wird derselbe erklingen, sobald wir den Bogen parallel der Saite führen. Es ist dies das merkwürdige Product einer Wechselwirkung, indem zunächst die Saite das Haarband in Querschwingungen versetzt, die sich jedoch sofort auf die Saite übertragen, um hier den, der Schwingungszahl des Haarbandes entsprechenden Oberton hervorzurufen. Der Ton des Haarbandes selbst lässt sich durch Streichen des letzteren mit einem zweiten Bogen nachweisen.

Eine dritte, meines Wissens noch nicht bekannte Art, Obertöne einer Saite hervorzurufen, besteht darin, dass man über der Stahlsaite eines Monochordes einen Elektro-Magneten anbringt, und diesen mit einer elektro-magnetisch bewegten Stimmgabel verbindet (Fig. 153).

Es ist einleuchtend, dass jeder Stromschluss der schwingenden Gabel eine Anziehung der Saite bewirken und diese somit zum Mitschwingen bringen muss, sobald die Eigenschwingungen der Saite mit jenen der Gabel zusammentreffen, oder ein Vielfaches derselben bilden.

Befindet sich die Saite mit der Gabel im Einklange, so wird sie sofort laut tönen, sobald letztere in Schwingung geräth. Wird die Saite nun durch Verschiebung des Steges immer mehr verkürzt, so erscheinen die Obertöne in der bekannten Reihenfolge und wir haben da ein Mittel, die denselben entsprechenden Saitenlängen auf das schärfste zu bestimmen und zu erkennen, dass sie mit den berechneten genau übereinstimmen. Bei allen anderen Stellungen des Steges bleibt die Saite stumm. Dieser, sowie der weitere Umstand, dass Stimmgabeln — wie dies seinerzeit näher nach-

[1]) Solche Abgrenzung wird am zweckmässigsten mit dem Daumen und Zeigefinger der bogenführenden Hand bewirkt. (Siehe Beilage X, Fig. 233*b*.)

gewiesen werden wird — keine tiefen, von Partialschwingungen herrührenden Obertöne haben, beweist, dass die Bewegung der Saite nicht durch »Mittönen« entsteht, sondern nur in der Periodicität der mechanischen Anziehungen derselben durch den Elektro-Magneten (bewirkt durch das Tempo der Schwingungen der Stimmgabel) ihren Grund habe, so zwar, dass die Saite, je nach dem Abstande des betreffenden Obertones, d. h. im Verhältnisse zur Schwingungszahl der diesem Obertone entsprechenden Saitenlänge, genau bei jeder ersten,

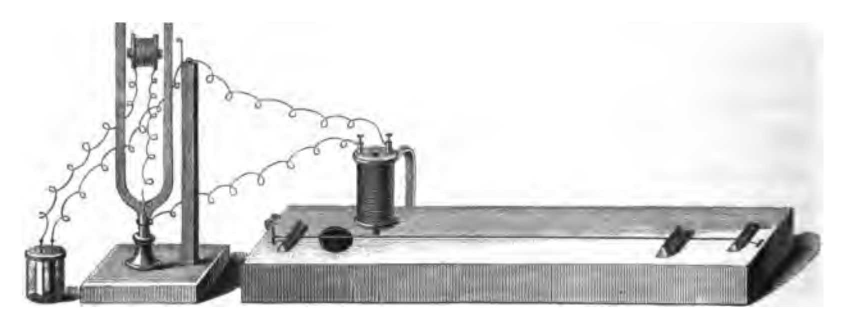
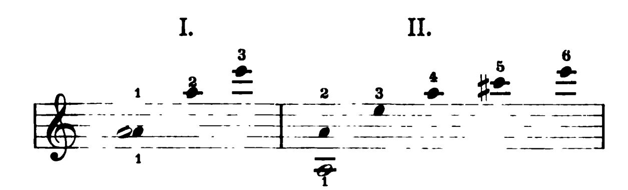


Fig. 153.

zweiten, dritten u. s. w. Schwingung vom Magneten angezogen wird. Ersetzen wir die Gabel durch eine um eine Octave tiefer tönende, so werden alle Obertöne der Saite um eine Octave tiefer klingen, weil ja in diesem Falle der Grundton der Saite der zweite Theilton des Stimmgabeltones ist, und es werden dieselben demnach nicht im Verhältnisse wie 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1 . . . . . , sondern wie 2 : 1, 4 : 1, 6 : 1 . . . . . auftreten, wie aus folgendem Beispiele erhellt.



Wir wollen diese Versuche ausführen und mit denselben für heute schliessen.

22. Vortrag.

(Saiten, Fortsetzung. — Obertöne. — Schwingungsformen.)

Wir hatten die Erfahrung gemacht, dass die Schwingungszahlen der Obertöne, welche wir einer Saite abzugewinnen vermögen, der natürlichen Zahlenreihe folgen. Es ist nun selbstverständlich, dass, wenn wir unsere Saite um einen beliebigen Theil mittelst des festen Steges verkürzen, alle, diesem neuen Grundtone entsprechenden Obertöne auf gleiche Weise erzeugt werden können, nur wird schliesslich die Ordnungszahl hier nicht so weit hinaufreichen, wie bei der längeren Saite.

Dieselbe Einschränkung wird eintreten, wenn wir die Saite straffer spannen, oder uns einer Saite von stärkerem Querschnitte oder dichterem Materiale bedienen. Und hier stossen wir auf ein weiteres akustisches Grundgesetz, welches nicht blos für die Saiten, sondern auch für die tönenden Luftsäulen (Pfeifen und Blasinstrumente) gilt, und von weittragender Bedeutung ist. Es lautet: Saiten wie Luftsäulen begünstigen in dem Maasse, als deren Länge ihren Querschnitt übertrifft, die Bildung höherer Obertöne, jedoch stets auf Kosten der Stärke und Klangfülle des Grundtones und seiner nächsten Obertöne. Von diesem Gesetze hängt, wie wir später erfahren werden, der charakteristische Klang, das Maass von Wohllaut und Kraft, wie der Tonumfang, welchen wir den auf Saite und Luftsäule basirten Musikinstrumenten geben wollen, in allererster Linie ab.

Ueberhaupt ist es ein für die Akustik allgemein giltiges Gesetz, dass ein Körper um so schwerer zum Tönen gebracht werden kann, je kürzer er unter sonst gleichen Umständen wird.

Aus dem zuvor Gesagten erklärt sich der schwache, klirrende Klang der alten, mit dünnen Messingsaiten bezogenen Claviere im Gegensatze zu den modernen Flügeln, deren Bezug mit den dickeren und dichteren Stahlsaiten, die in Folge ihres grossen inneren Widerstandes, wie jenes der Eisenconstruction hohe Spannungen zulassen, mithin der Bildung voller Grundtöne und der nächsten harmonischen Obertöne förderlich ist.

Ebenfalls daher kommt es, dass lange, enge Pfeifen und Röhren theils schwer, theils gar nicht den Grundton angeben können, dagegen

um so leichter in die höheren Obertöne überblasen. Sogenannte Naturinstrumente, wie die einstigen Hörner und Trompeten, deren Töne nur aus Obertönen bestehen, wonach ihre diatonische Scala erst innerhalb der vierten Octave liegt, würden diese Höhe bei einem, die tieferen Octaven begünstigenden, weiteren Bau ihrer Röhren nur schwer erreichen.

Streichinstrumente unterliegen nicht minder diesem Gesetze. Dünne Saiten, welche eine mühelosere Spielart und das leichtere Hervorbringen der Flageoletttöne ermöglichen, sind mager im Klange; das Bestreben, diesen bei gleichen technischen Annehmlichkeiten mehr Kraft und Glanz zu geben, was in diesem Falle nur durch grössere Spannung erreicht werden kann, war eine der Hauptursachen, warum die Stimmung in allen Orchestern immer höher wurde. Eine zu starke Besaitung würde die entgegengesetzten Uebelstände: schwere Spielart, unsichere Ansprache und dumpfen Klang (wegen der mangelnden höheren Obertöne) zur Folge haben.

Es gibt eine zuverlässliche Methode, um für die Besaitung der Streichinstrumente, insbesonders der Violinen, jene Stärken zu ermitteln, die bei normaler Spannung der Saite deren vollsten und zugleich brillantesten Ton ermöglichen. Die Methode besteht darin dass man eine Saite von der entsprechenden Länge mit Gewichten so lange spannt, bis sie reisst. Wenn das nächste Stück, mit $^4/_5$ jenes Gewichtes gespannt, den der Saite zukommenden Ton gibt, so ist die Dimension die beste und sie kann dann, die gleichmässige Güte des Fabrikates vorausgesetzt, als die normale für das betreffende Instrument angesehen werden. Ist der Ton zu tief, so muss mit einer stärkeren, und im entgegengesetzten Falle mit einer schwächeren Saitennummer derselben Sorte der Versuch fortgesetzt werden.

Was die äussere Form der Schwingung betrifft, so erscheint diese unserer gewöhnlichen Betrachtungsweise bei den verschiedensten Erregungsarten als unverändert dieselbe, denn sie bietet dem Auge stets das Bild eines gleichartigen, mehr oder weniger flachen, um seine Ruhelage oscillirenden Bogens. In Wirklichkeit ist dies jedoch keineswegs der Fall. Nichts kann mehr von einander verschieden sein als die Form, die eine schwingende Saite zeigt, wenn sie mit dem Bogen gestrichen, oder wenn sie geschlagen oder gerissen wird, ja es werden Unterschiede entstehen, wenn man den Schlag

mit einem harten oder weichen Gegenstande, das Reissen mit dem Finger oder mit einem Metallstifte bewirkt; endlich werden weitere Abweichungen eintreten, je nachdem man die Erregungsstelle mehr gegen die Mitte, oder gegen das Ende der Saite verlegt. Man wird übrigens auch ohne experimentelle Bestätigung von der ursprünglichen Ansicht bald abkommen, wenn man auf die Unterschiede achtet, welche die Klangfarbe derselben Saite bei den verschiedenen Erregungsarten erfährt.

Wir brauchen nur die Saite einmal in der Mitte und hierauf mehr gegen das Ende hin zu streichen oder zu reissen, um uns der merklichen Verschiedenheit der jeweiligen Beschaffenheit ihres Klanges bewusst zu werden.

Betrachtet man nun das Bild, welches die schwingende Saite bei jeder dieser verschiedenen Erregungsarten darbietet, genau, so gewahrt man in dem Raume, innerhalb dessen die Saite schwingt, und welcher Raum wie eine durch zwei flache Bögen begrenzte, von einem feinen Gewebe ausgefüllte Fläche erscheint, Bewegungen, deren Verschiedenheiten auf einen Zusammenhang mit den Aenderungen der Klangfarbe hindeuten. Ja nach der Stelle, von welcher aus die Saite in Schwingung versetzt wird, erblickt man in jenem Gewebe ein zweites Saitenbild, welches sich langsam hin und her bewegt, und jenseits des betreffenden Knotenpunktes die entgegengesetzte Bewegung vollführt. Es können auch mehrere solcher Bilder in gegenseitiger gleichzeitiger Bewegung beobachtet werden. Sie stellen offenbar die Schwingungen der betreffenden Partialtöne dar. Am deutlichsten beobachtet man diese Erscheinung an einer langen, glänzenden, gut beleuchteten Stahl- oder Messingsaite.

Zum Behufe der Beobachtung der einzelnen Phasen, welche die verschiedenartigen Schwingungsformen gestrichener, geschlagener und gerissener Saiten durchlaufen, bedient man sich entweder der, in periodisch intermittirender Sichtbarmachung des schwingenden Körpers bestehenden stroboskopischen, oder der in unserem Falle minder complicirten und zur Demonstration besser geeigneten graphischen Methode.

Um letztere anzuwenden, versieht man die Saite mit einem Schreibstiftchen aus Draht oder Borste und lässt sie ihre Schwingungen auf einen unter dem Schreibstiftchen vorbeigleitenden berussten

Glasstreifen selbstthätig aufzeichnen,[1]) die man dann mittelst des Projectionsapparates zur Anschauung bringt.

Diese Methode ist zudem ausnehmend gut geeignet, in dem Saitenklange das Vorhandensein von Partialschwingungen nach ihrer Menge und Ordnungszahl in jenen Fällen nachzuweisen, in welchen die Schwingungen nicht einfache, d. h. pendelartige sind, und demzufolge von der reinen Wellenform abweichen.

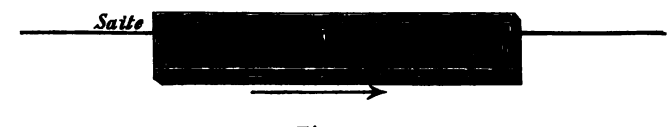


Fig. 154.

Versuchen wir die Darstellung der Schwingungsform einer regulär gestrichenen Saite.

Wir ersehen aus der projicirten Schwingungsfigur (Fig. 155), dass sie mit der Curvenform nichts gemein hat, sondern mehr sägeförmig erscheint, eine Erscheinung, die nicht schwer zu erklären ist.



Fig. 155.

Pferdehaare, und aus solchen besteht das Haarband des Geigenbogens, sind, wie schon Seite 165 und 166 ausgeführt wurde, mit Zähnen versehen, die das Geigenharz aufnehmen. Dadurch erlangt das Haarband die Fähigkeit, die Saite zu fassen, sie mehr oder weniger über die Ruhelage zu ziehen und sie so lange festzuhalten, bis sie vermöge der erhöhten Spannung, die sie durch ihre Ausbiegung erfährt, sich losreisst, und rasch auf die entgegengesetzte Saite schwingt, wo sie abermals vom Haarbande des Bogens erfasst wird. Die Schwingungen sind in ihren Phasen ungleich beschleunigt, aber in ihrer Form vollkommen regelmässig, weil periodisch.

Aus der eben erwähnten Wirkungsweise des Bogens erklärt sich auch, dass man sehr hohe Violintöne nicht mit einem schweren

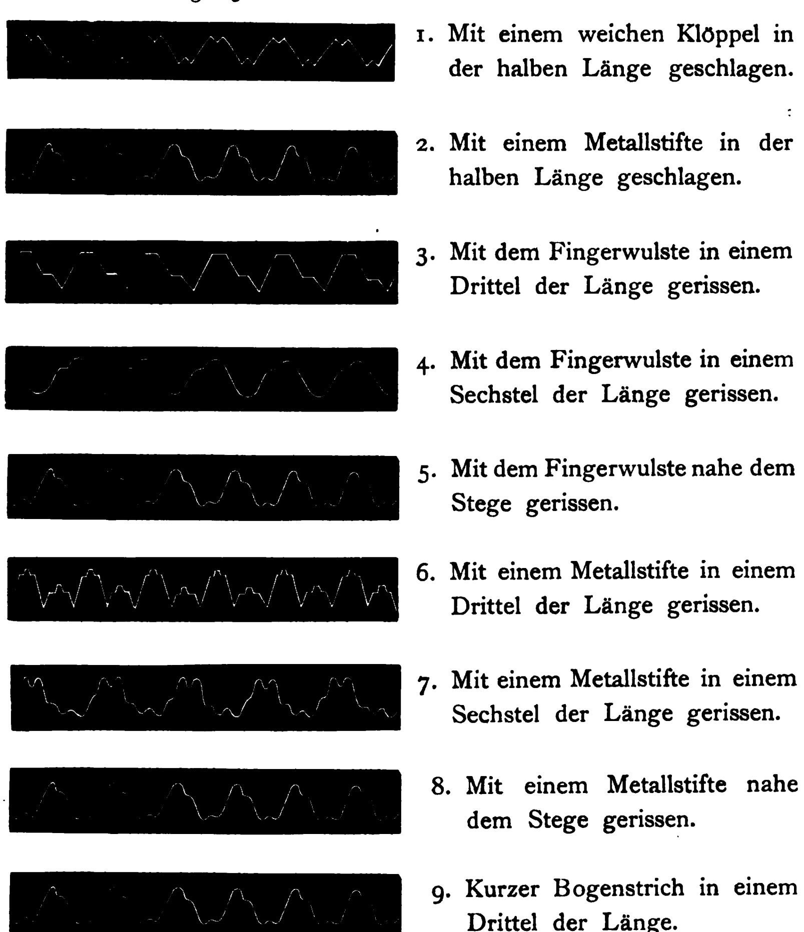
---

[1]) Um dies präcis bewerkstelligen zu können, empfiehlt sich die Anfertigung eines leichten, unter der Monochordsaite angebrachten Schlittchens, in das man den Glasstreifen einlegt und damit an dem schwingenden, das Glas berührenden Schreibstiftchen schnell vorüberfährt, wie Figur 154 andeutet.

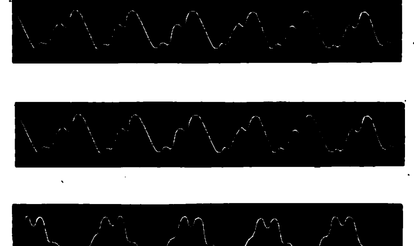
und langsamen Bogenstriche, wobei nur ein schnarrendes Geräusch entstehen würde, wohl aber mit einem leichten und raschen Striche bequem herausbringt, während im Gegentheile die schweren steifen Saiten des Contrabasses durch leichtes und rasches Streichen mittels eines Violinbogens nicht gut zum Tönen zu bringen sind.

Schliessen wir für heute mit einigen in Figur 156 dargestellten Versuchen, um die Formen zu beobachten, welche die Schwingungen einer Saite annehmen, wenn wir sie auf verschiedene Weise in Bewegung setzen, und zwar:

Fig. 156.



1. Mit einem weichen Klöppel in der halben Länge geschlagen.
2. Mit einem Metallstifte in der halben Länge geschlagen.
3. Mit dem Fingerwulste in einem Drittel der Länge gerissen.
4. Mit dem Fingerwulste in einem Sechstel der Länge gerissen.
5. Mit dem Fingerwulste nahe dem Stege gerissen.
6. Mit einem Metallstifte in einem Drittel der Länge gerissen.
7. Mit einem Metallstifte in einem Sechstel der Länge gerissen.
8. Mit einem Metallstifte nahe dem Stege gerissen.
9. Kurzer Bogenstrich in einem Drittel der Länge.



10. Kurzer Bogenstrich in einem Sechstel der Länge.

11. Continuirlicher leichter Bogenstrich in der halben Länge.

12. Continuirlicher kratzender Bogenstrich nahe dem Stege.

Fig. 156.

Alle diese Formen weichen wesentlich von der regulären Wellenform ab, wie sie, um an ein Ihnen bereits bekanntes Beispiel zu erinnern, eine Stimmgabel aufzeichnet. Eine solche Wellenform (Fig. 157) wird auch unsere Saite, jedoch nur in dem Falle erzeugen, wenn wir sie in ihrer Mitte entweder durch einen, mit einem weichen Tampon geführten leichten Schlag, oder durch Beiseiteziehen (etwa mit zwei Fingern oder, was zweckdienlicher ist, mittels eines Fadens, den man um die Saite schlingt, spannt und hierauf anzündet) in Schwingung versetzen. Diese Abweichung zu begründen, wird uns ein andermal beschäftigen.



Fig. 157.

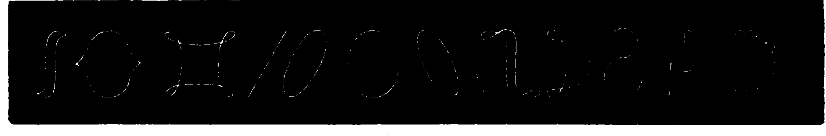


Fig. 158.

Eine andere Methode, die verschiedenen Schwingungsformen einer Saite zu beobachten, beruht darin, dass man an deren Schwingungsbauche einen leuchtenden Punkt (etwa einen mit Klebwachs befestigten Splitter einer sogenannten Silberglasperle) anbringt, denselben scharf beleuchtet, und in schräger Richtung mit freiem Auge oder durch die Loupe betrachtet. Je nach dem Orte und der Art der Erregung werden sich verschiedene Figuren bilden, wie deren einige die Figur 158 darstellt.

23. Vortrag.

(Saiten, Fortsetzung. — Coëxistenz der Schwingungen. — Klangfarbe.)

Wir haben uns das letztemal überzeugt, dass die Art, wie man eine Saite zum Tönen bringt, sich schon durch den Charakter des Klanges derselben bemerkbar macht, und es ist nun die Frage, worin der Grund besteht, dass eine, in gleicher Weise und an gleicher Stelle in Schwingung versetzte Saite stets denselben charakteristischen Klang hören lässt, kurz, worin das Wesen der sogenannten Klangfarbe beruht, die uns in den Stand setzt, einem Tone von genau derselben Schwingungszahl es sofort anzumerken, ob er von einer Geige, Flöte, Trompete, Orgelpfeife oder irgend einem sonstigen Instrumente oder der menschlichen Stimme angegeben worden ist.

Unser Monochord gibt uns das Mittel zur Erklärung dieses Phänomens an die Hand. Streichen wir beispielsweise die Saite mit dem Bogen genau in ihrer Mitte und dämpfen wir sie mit einem mit Filz beklebten, kleinen Stäbchen, oder mit einem Federbart oder mit dem Finger sofort an derselben Stelle, so wird sie überhaupt aufhören zu tönen. Behalten wir dieselbe Dämpfungsstelle bei, führen aber den Bogenstrich näher einem Ende der Saite, so wird, wie wir bereits wissen, an dieser Stelle der Knoten sich bilden, die Saite in Hälften schwingen und die Octave hören lassen.

Warum entstand im ersten Falle der Oberton nicht? Einfach deshalb, weil wir die Saite gerade an jener Stelle zur grössten Elongation zwangen, wo der Oberton seinen Knotenpunkt hat.

Es ist bekannt, dass von zwei gleichgestimmten Saiten die eine von selbst in Bewegung geräth und demzufolge mittönt, wenn die andere in Schwingung versetzt wird, wie man dies an unserem Monochorde leicht wahrnehmen kann. Ein, der nicht berührten Saite aufgesetzter Reiter wird abgeworfen. Wir wollen nun eine Saite des Monochordes genau um eine Octave höher stimmen als die andere, was wir durch eine entsprechende Verrückung des Steges leicht bewerkstelligen. Wir wiederholen das vorige Experiment in der Art, dass wir die tiefere Saite in der Mitte anstreichen, und hierauf sofort vollständig dämpfen. Die zweite Saite wird stumm, der ihr aufgesetzte Reiter unbewegt bleiben.

Streichen wir aber die tiefere Saite näher ihrem Ende, und machen sie abermals vollständig verstummen, so wird jetzt die zweite unberührte Saite ihren Grundton hören lassen und der Reiter abgeworfen werden.

Was schliessen wir aus dieser Erscheinung? Doch wohl, dass in dem Klange der tieferen Saite im letzten Falle die Octave enthalten sein müsse, was im ersteren offenbar nicht der Fall war, weil sonst die höhere Saite ebenfalls in Mitschwingung gerathen wäre. Nothwendig müssen wir aber weiters schliessen, dass im letzten Falle in der tieferen Saite gleichzeitig der, die höhere Saite zum Mitschwingen veranlassende Klang der Octave vorhanden war, dass die Saite zugleich zweierlei Töne gegeben, oder, was dasselbe besagt, zweierlei Schwingungsarten zugleich vollführte, die im Verhältnisse von 2 : 1 stehen. Endlich folgern wir, dass in dem Tone der tiefen Saite, als wir sie in ihrer Mitte erregten, der zweite Ton nicht vorhanden war, und dies einfach deshalb nicht sein konnte, weil die Bildung des zur Darstellung des Obertones erforderlichen Knotens dadurch verhindert wurde, dass wir die Saite an der Stelle in Schwingung versetzten, an welcher dieser Oberton sein Schwingungsminimum hat.

Vorausgesetzt also, dass ein weiterer Verfolg unseres Experimentes darthun würde, dass die Obertöne, welche wir der Saite früher der Reihe nach einzeln entlockten, mit ihrem Grundtone insgesammt gleichzeitig ertönen, ferner, wenn es sich herausstellen sollte, dass in jedem Falle aus dem Klange einer Saite jene Obertöne ausgeschieden werden, die an der Erregungsstelle ihren Knotenpunkt haben, so sind wir im Stande, uns Rechenschaft zu geben, warum der Klang unserer Saite in jedem der beiden Fälle einen anderen Charakter hatte, und wir können nun vorläufig das Wesen der Klangfarbe dahin definiren: dass es eine, auf der grösseren oder geringeren Zahl der den Grundton begleitenden Obertöne beruhende Erscheinung ist.

Wollen wir uns von dem durch logische Schlüsse Gefundenen experimentell überzeugen, so gelingt uns dieses in zweierlei Weise, nämlich: direct an einer und derselben Saite, und indirect mittelst des Phänomens des Mittönens einer zweiten Saite. Zu ersterem Experimente bedienen wir uns unseres Monochordes, zum zweiten werden wir die kräftigeren Klänge des Klavieres heranziehen.

Wenn wir mit dem Finger der linken Hand die Saite des Monochordes im Drittel von ihrem Ende leise berühren, das Drittel selbst mit dem Finger der rechten Hand zerren und in dem Momente, wo dies geschieht, den Finger der linken Hand so abgleiten lassen, dass auch da eine Zerrung erfolgt, so wird, wenn wir geschickt operirten, der Grundton und zugleich der Oberton, die Duodecime, erklingen und es liegt in unserer Willkür, beide Töne gleich stark, oder den einen Ton gegen den anderen stärker oder schwächer hervorzurufen. Es leuchtet ein, dass wir mit der linken Hand den Grundton erregten, während die rechte den Oberton hervorrief. Selbstverständlich lassen sich auf diese Art oder mittelst Stimmgabeln auch andere Obertöne gleichzeitig mit dem Grundtone oder mit einem anderen Obertone darstellen, wie solches Ihnen letzthin demonstrirt wurde.



Fig. 159.

Uebrigens bedarf es, um das gleichzeitige Auftreten einer grösseren oder geringeren Menge von Partialschwingungen in einer Saite hervorzurufen, gar keiner künstlichen Erregungs- und Dämpfungsmittel. Es genügt dazu ein langer gespannter Draht und — bewegte Luft. So lassen Telegraphendrähte unter günstigen Umständen eine grosse Zahl von Obertönen gleichzeitig hören. Auch an der sogenannten Wind- oder Aeolsharfe (Fig. 159), (einem, mit mehreren schwach gespannten und im Einklange gestimmten Darmsaiten versehenen, ungefähr meterlangen schmalen Resonanzkasten, den man entweder im Freien, oder zwischen einer Thür- oder Fensterspalte aufstellt), lässt sich dieses Phänomen beobachten, wenn man alle Saiten bis auf eine dämpft; denn die sonst auftretenden verschiedenen Obertöne sind im Allgemeinen das Product mehrerer Saiten. Leider eignet sich dieses Instrument, gleich dem Telegraphendrahte, nicht besonders zum Demonstrationsobjecte, da es an der Marotte leidet, sich nur beim Vorhandensein einer kräftigen Luftströmung vernehmen zu lassen.

Die Coëxistenz von Obertönen mit dem Grundtone, die Sie soeben mit dem Gehöre wahrnahmen, sollen Sie nun auch zu sehen bekommen, allerdings an der Saite selbst nicht, da deren Bewegungen zu klein sind, um auch bei Anwendung des Stroboskopes mit unbewaffnetem Auge beobachtet werden zu können. Ich zeige Ihnen deshalb das Beisamensein von Grundton und Octave (Fig. 160 a) und von Grundton und Duodecime (Fig. 160 b) in projicirten Bildern.

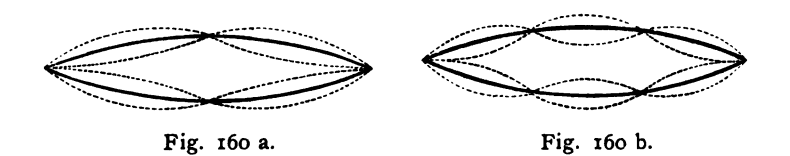


Fig. 160 a. Fig. 160 b.

Den Grundton allein der stroboskopischen Betrachtung zu unterziehen, bietet jedoch keine Schwierigkeit, und wollen wir diesfalls mit dem Figur 161 dargestellten Apparate einige Versuche ausführen.

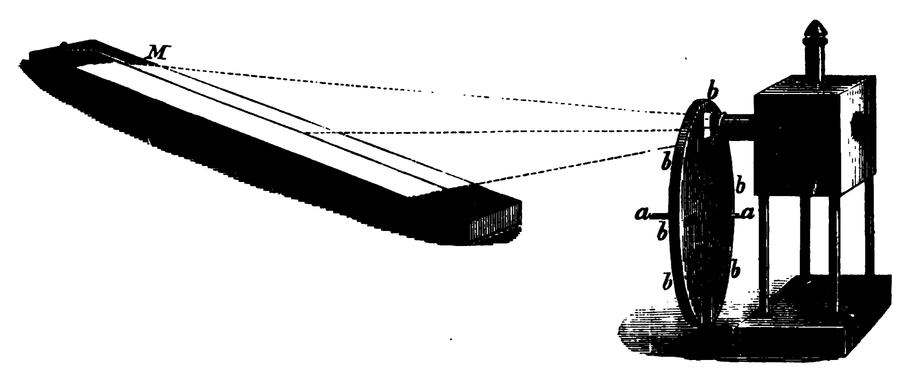


Fig. 161.

Die stroboskospische Methode beruht im Wesentlichen darin, dass man den schwingenden Körper — in unserem Falle die Saite — entweder durch vor dem Auge periodisch vibrirende oder vorüberziehende Oeffnungen betrachtet, oder ihn intermittirend beleuchtet, was auf verschiedene Art: durch Inductionsfunken, rotirende spiegelnde Prismen, oscillirende Lichtspalten u. dgl., am einfachsten aber in der Weise unseres Apparates, nämlich mittels einer, mit

radialen Spalten versehenen, vor einer kräftigen Lichtquelle rotirenden Scheibe bewirkt werden kann.

Verfinstern wir unseren Hörsaal und lassen das Licht der elektrischen Lampe auf die glänzende Messing- oder Stahlsaite unseres Monochordes durch die Spalten der rotirenden Scheibe fallen. — So oft eine Spalte der Scheibe an der Lichtquelle vorübergeht, wird die Saite (in Folge der schrägen Stellung des Monochordes zum Lichtkegel) ihrer ganzen Länge nach beleuchtet werden, sonst aber nicht sichtbar sein.

Wird nun die Saite bei jeder zweiten, vierten, sechsten, achten u. s. w. einfachen Schwingung beleuchtet, so sieht man sie immer an derselben Stelle; bei Beleuchtung derselben während jeder einfachen Schwingung hingegen wird die Saite abwechselnd entgegengesetzte Phasen zeigen, den Fall ausgenommen, wenn die Lichtblitze mit dem Durchgange der Saite durch ihre Ruhelage zusammentreffen.

Stimmt das Tempo der Lichtblitze mit jenem der Schwingungen nicht genau überein, so wird die Saite das Bild eines mehr oder weniger langsamen Hin- und Herschwingens darbieten, aus welchem sich, wenn die Zahl der in einer bestimmten Zeit erfolgenden Lichtblitze bekannt ist, die Schwingungszahl der Saite ableiten lässt [1].

Kehren wir wieder zu unserem Thema zurück.

Da die Obertöne je nach der Natur und jeweiligen Form der Tonquelle mehr oder weniger in jedem Grundtone thatsächlich vorhanden sind, indem sie nachweislich jedesmal bei entsprechender Erregung desselben zugleich mit ihm sich bilden und erklingen, so ist es klar, *dass wir sie empfinden*, weil wir sonst nicht im Stande wären, die Veränderung in dem Klange eines und desselben Grundtones sofort wahrzunehmen und zu bezeichnen, die *durch die Ausscheidung von Obertönen* entsteht, ein Thema, dem wir im nächsten Vortrage eine ausführlichere Betrachtung widmen werden

Wenn wir die Saite in ihrer Mitte oder in einem Drittel oder an einem noch weiter gegen ihr Ende gelegenen Punkte erregen

[1] Sendet man durch die Spalten der Scheibe einen continuirlichen Luftstrahl, so bietet der dadurch hervorgerufene Ton das einfache Mittel dar, die Rotationen der Scheibe (bei Handbetrieb) mit dem Tone der Saite in beliebig grössere oder geringere Übereinstimmung zu bringen.

so wird uns im ersten Falle, in welchem wir die geradezahligen Obertöne, nämlich alle Partialschwingungen, die in der Mitte der Saite ihren Schwingungsknoten haben — man vergleiche die Tabelle der Schwingungen einer Saite in der Beilage IV — beseitigten, der Klang hohl, näselnd, im zweiten zufolge der Beseitigung jener Obertöne, welche im Drittel der Saite ihren Knotenpunkt haben (wie der 3., 6., 9., 12., 15. Theilton) leer, aber schon etwas klarer, hingegen im dritten Falle, wenn wir die Saite von einem Punkte aus in Vibration versetzen, der die ungehemmte Entwicklung einer möglichst vollständigen Reihe harmonischer Obertöne begünstigt, voll und gesättigt erscheinen, wogegen eine, nahe einem ihrer Endpunkte erregte Saite wegen der in Folge dessen auftretenden, vorherrschend höheren, also unharmonischen Obertöne scharf und klimpernd klingt.

Selbstverständlich ist es, dass auch die Art, wie wir die Schwingung einer Saite einleiten, auf das stärkere oder schwächere Hervortreten gewisser Obertöne von wesentlichem Einflusse ist, welcher Einfluss auch aus den von Partialschwingungen herrührenden Varietäten der Lichtfigur einer und derselben schwingenden Saite zu erkennen war, die wir im letzten Vortrage zu beobachten Gelegenheit hatten. Ebenso haben Ihnen die, von der Saite selbst aufgezeichneten Bilder ihrer verschiedenen Schwingungsformen (Fig. 155, 156, 157) den Beweis geliefert, dass die Partialtöne sich anders entwickeln, wenn wir die Saite in verschiedener Weise mit dem Bogen streichen, dann wieder anders, wenn wir sie zerren oder schlagen und hiezu verschiedene Stoffe und verschiedene Berührungsstellen wählen, mit und an welchen wir die Saite in Schwingung versetzen, wie dies im vorigen Vortrage gezeigt wurde. Dass auch das Material, die Dichtigkeit, Dicke und Spannung wesentlich zur Aenderung der Klangfarbe beitragen, wurde ebenfalls schon bemerkt.

Darmsaiten haben keine klirrenden Obertöne, weil sie zu leicht im Material sind. Die Partialtöne stark gespannter dicker Saiten reichen nicht weit hinauf, denn die hohen Obertöne können wegen der Unfähigkeit solcher Saiten, sich in kleine Schwingungstheile zu zerlegen, nicht zustande kommen. Daher der harmonische volle Klang solcher Saiten.

Der sonore, reiche, prächtige, volle Klang der neueren Meisterklaviere gründet sich aber nicht nur, wie schon angedeutet, auf die

grössere Steifigkeit der starken Stahlsaiten, welche die Bildung hoher, dissonanter Obertöne nicht begünstigen, sondern beruht auch auf der richtigen Wahl der Anschlagsstelle, wodurch die in der Reihe der tiefen Obertöne zunächst auftretenden, durch ihre relative Intensität noch hinlänglich wahrnehmbaren, unharmonischen Partialtöne aus dem Klange der Saite ausgeschieden werden, wovon sogleich ausführlicher die Rede sein soll. Die Möglichkeit, den Klang durch Auslöschung von Obertönen zu modificiren, bietet den Spielern von Streichinstrumenten ein Mittel zu mannigfaltiger Färbung des Tones dar, die sich durch Führung des Bogens näher dem Griffbrette oder dem Stege — wodurch gewisse Obertöne aus dem Klange getilgt werden — hervorbringen lassen. Auch die Spieler von Instrumenten, wie Harfe, Guitarre, Zither u. dgl., deren Töne durch Beiseiteziehen und Loslassen der Saite hervorgerufen werden, haben die Modification des Klangcharakters durch die Wahl der Erregungsstelle in ihrer Macht.

Zum Schlusse soll Ihnen jetzt ein Experiment vorgeführt werden, dessen Ergebniss mit der Begründung eines analogen Phänomens, das wir im letzten Vortrage kennen lernten, geradezu im Widerspruche zu stehen scheint.

Wir hatten mittelst Stimmgabeln Obertöne der Saite hervorgerufen und dabei die Erfahrung gemacht und auch den Grund erkannt, warum dieselben nicht zu Stande kommen, wenn wir die Saite an einem Knotenpunkte berühren. — Wir werden die Saite jetzt wieder mit der schwingenden Gabel in Contact bringen, jedoch nicht die Zinke, sondern den Stiel auf die Saite setzen. — Diesmal wird es nur dann gelingen, einen Klang hervorzurufen, wenn die Gabel auf einem Knotenpunkte der Saite ruht, der diejenige Seitenlänge abgrenzt, deren Tonhöhe mit der der Stimmgabel übereinkommt.

Dieser Widerspruch, der darin zu beruhen scheint, dass wir mit derselben Stimmgabel in einem Falle bei Berührung des Knotens, in anderen bei Berührung des Bauches einen Klang nicht zu wecken vermögen, ist in Wirklichkeit keiner; denn in dem ersten Falle ist es die Saite, welche klingt und die Gabel ist blos die Weckerin dieses Klanges, wogegen im zweiten Falle die Saite nur die Fortpflanzerin der Gabelstösse zum Steg und weiter zum Resonanzboden ist und nicht der Saiten-, sondern der Gabelton es ist, den wir im letzteren

Falle vernehmen. In diesem Falle vertritt der Knotenpunkt die feste Abgrenzung der dem Gabeltone entsprechenden Saitenlänge.

Im nächsten Vortrage werden wir das Thema der Coexistenz der Obertöne zu Ende bringen und das Capitel »Saiten« mit der Betrachtung ihrer Längs- und Drehschwingungen überhaupt abschliessen.

---

24. Vortrag.

(Coexistenz der Obertöne. — Längs- und Drehschwingungen der Saiten. — Die Saiteninstrumente.)

Um einer Mehrzahl von Hörern die bisher in directer Weise nachgewiesene Coexistenz der Obertöne in einer Saite nun auch mittelst des Phänomens des Mitklingens demonstriren zu können, werden wir uns der kräftigen Klänge des Klaviers bedienen müssen. Man kann den Nachweis auf zweierlei Art führen. Erste Art. Heben wir den Dämpfer eines tieferen Saitenchores, beispielsweise des Tones C_0, und schlagen kurz und kräftig der Reihe nach, oder insgesammt, oder gruppenweise zugleich die den Obertönen 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 entsprechenden Tasten c^0, g^0, c^1, e^1, g^1, b^1, c^2, d^2 an, so werden diese Töne deutlich fortklingen, wiewohl die angeschlagenen Töne sofort verstummt sind. Dass dieses Nachklingen allein von der C_0-Saite ausgeht, beweist der Umstand, dass alle diese Nachklänge sofort aufhören, sobald wir den Dämpfer der C_0-Taste fallen lassen. Ebenso zweifellos ist es, dass die Obertöne der C_0-Saite lediglich durch das Mitschwingen geweckt wurden, weil ja die C_0-Taste unberührt geblieben ist.

Zweite Art. Halten wir die Tasten der zuvor genannten Obertöne niedergedrückt, ohne dass die Saiten von den Hämmern berührt werden, und schlagen das C_0 kurz und kräftig an, so werden die Töne c^0, g^0, c^1, e^1, g^1 und b^1 deutlich zu vernehmen sein, ein Beweis, dass dieselben sämmtlich mit dem Klange der angeschlagenen C_0-Saite erschienen, mithin gleichzeitig vorhanden sein müssen, weil sonst ein Mittönen der Saiten jener sechs Tasten nicht hätte erfolgen können. Dass aber das Nachtönen von diesen sechs Saitenchören

ausgeht, ergibt sich, sobald man die Taste loslässt, aus dem sofortigen Verstummen des betreffenden Tones. — Ein neuer Umstand fällt uns aber hierbei auf. Die Töne c^2 und d^1 nämlich, die beim früheren Versuche deutlich zu hören waren, kamen hier nicht zum Vorschein. Warum? — Um die Antwort auf diese Frage zu finden, müssen wir die obigen Versuche in einer Weise abändern, die uns den zur Erklärung des Vorganges erforderlichen näheren Einblick in das akustische Verhalten des Klaviertones erschliesst.

Zu diesem Zwecke werden wir unsere 1446 Millimeter lange C_0-Saite an den Knotenpunkten ihrer Obertöne bis einschliesslich den 9. abgrenzen u. zw.:

für	$c^0 = 1/_2$	der	Länge	723	Mm.
»	$g^0 = 1/_3$	»	»	482	»
»	$c^1 = 1/_4$	»	»	$361\,1/_2$	»
»	$e^1 = 1/_5$	»	»	$289\,1/_5$	»
»	$g^1 = 1/_6$	»	»	241	»
»	$b^1 = 1/_7$	»	»	$206^3/_7$	»
»	$c^2 = 1/_8$	»	»	$180\,3/_4$	»
»	$d^2 = 1/_9$	»	»	$160\,2/_3$	»

(vom Schränkstifte des Resonanzbodensteges ab gemessen), welche Punkte wir zur leichteren Auffindung mit kleinen Dämpfern markiren wollen. Wenn wir nun eine der nicht gedämpften Saiten unseres C_0-Chores an einem solchen Punkte mit einem Reiter versehen und jene Taste anschlagen, deren Tonhöhe mit dem Obertone übereinstimmt, auf dessen Knotenpunkte der Reiter sich befindet, so wird dieser unbewegt bleiben, während er sofort abgeworfen wird, sobald wir ihn nur um ein Geringes nach rechts oder links verrücken.

Setzen wir den Reiter auf die Saite einer stumm niedergehaltenen Taste, deren Ton einem Obertone unserer C_0-Saite gleichkommt, so werden wir durch einen kräftigen Anschlag des C_0 die Saite der niedergehaltenen Taste zum Mitschwingen veranlassen, wodurch der Reiter abgeworfen wird. Es wird uns dies bei allen Obertönen, bis zum siebenten hinauf — falls nur diese vollkommen rein, d. i. nicht temperirt gestimmt sind — unfehlbar gelingen, nicht aber beim achten und neunten Obertone, trotzdem wir — umgekehrt — in der C_0-Saite durch den Anschlag des c^2 und d^2 diese Töne deutlich hervorzurufen vermögen.

Der Grund dieser Erscheinung wird uns nun aber sofort klar werden, wenn wir die Länge der C_0-Saite zwischen der Stiftenlinie des Stimmstocksteges und dem Punkte, welcher von der Mitte des Hammerkopfes getroffen wird, abmessen, welche Länge 172 Millimeter beträgt. Dieser Punkt liegt aber fast genau in der Mitte zwischen den Knotenpunkten des $c^2 = 180$ Millimeter und des $d^2 = 160$ Millimeter. Zudem misst die Strecke des Hammerkopfes, mit der er die Saite beim Anschlage berührt, beiläufig 12 Millimeter, so dass man also beide Knotenpunkte als zugleich getroffen ansehen darf.

Nun leuchtet ein, dass ein Punkt der Saite, der durch die Berührung des Hammers in Bewegung versetzt wird, nicht zugleich ein Knotenpunkt, d. h. ein Punkt der Ruhe sein kann. Durch die Wahl dieses Anschlagpunktes können also der achte und neunte Oberton in der angeschlagenen C_0-Saite nicht zustande kommen, sie sind aus deren Klange ausgeschieden worden und es kann demnach ein Mitschwingen der Saiten der c^2- und d^2-Taste nicht stattfinden. —

Ausser den bisher betrachteten Querschwingungen vermag die Saite noch zweierlei ganz verschiedene Arten von Schwingungen zu vollführen, nämlich Längsschwingungen und Drehschwingungen, welch' erstere man auch Longitudinal-, die letzteren aber Torsionsschwingungen zu nennen pflegt.

Entdecker dieser beiden Arten von Schwingungen war ebenfalls Chladny.

Das Wesen der Längsschwingungen haben wir bereits kennen gelernt; es beruht in abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der in der Längsrichtung des tönenden Körpers hin- und her-oscillirenden Molecule.

Der Longitudinalton wird bei Saiten durch spitzwinkelige Bogenführung oder durch Längsreibung mittels eines, mit Geigenharz bestaubten Leders hervorgerufen. Bei Metallsaiten kann statt des Geigenharzes auch Wasser oder Alkohol angewendet werden.

Die auf diese Weise der Saite entlockten Töne eignen sich aus mehreren Gründen nicht zu musikalisch-praktischem Gebrauche. Erstens klingen sie unangenehm, weil sehr schrill; dann sind sie von sehr kurzer Dauer, da sie fast unmittelbar nach dem Erklingen verlöschen; weiters steht ihre Tonhöhe in keinem Verhältnisse zu den Dimensionen der Saite und des Resonanzraumes, da man mit einer —

je nach dem Material — drei- bis fünfmal kürzeren, transversal schwingenden Saite, also mit einem weit geringeren Aufwande von Mitteln dieselben Töne hervorbringen kann, die überdies bildsamer und wohlklingender sind; endlich besteht zwischen den Grundtönen der Längs- und der Querschwingungen keine bestimmte Beziehung, weil die Spannungen der Saite von einem nur sehr geringfügigen Einflusse auf die Tonhöhe sind, und diese mit Aenderungen der Spannung, der Masse wie des specifischen Gewichtes der Saite keine gesetzmässigen Verhältnisse aufweist. Nur in Bezug auf Partialschwingungen folgen sowohl die Longitudinal- wie die sogleich zu betrachtenden Torsionstöne der Ordnung der Obertöne querschwingender Saiten. —

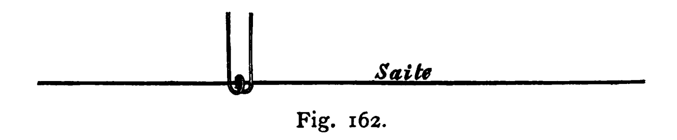


Fig. 162.

Von noch geringerem musikalischen Werthe als die Longitudinaltöne sind die Torsionstöne der Saiten, die man hervorruft, indem man letztere zwischen Ende und Mitte in der Richtung zur Ebene ihres Querschnittes mit einem beharzten, um die Saite geschlungenen Seidenbande durch Hin- und Herziehen desselben reibt (Fig. 162). Die Schwingungsweise ist analog der häufig als Spann-



Fig. 163.

feder gebräuchlichen, elastischen Drähte, die durch Drehung um ihre Längenaxe den Dienst automatischer Thürverschliesser leisten. Diesen oscillatorischen Vorgang versinnlicht diese kleine Vorrichtung (Fig. 163) (ein an die Saite gekitteter, oder nach Art einer Zwinge befestigter, an seinem Ende mit einer kleinen glänzenden Perle versehener, kurzer, dünner Metallstreifen), wenn man dem der Pendelbewegung analogen Gange der Perle folgt. Die durch die Drehung schraubenförmig sich verschiebenden und durch die Zusammendrängung, be-

ziehungsweise Dichterstellung, gespannten Theilchen schnellen bei ihrer Rückschwingung vermöge ihrer Elasticität über die Ruhelage hinaus und leiten dadurch regelmässige Oscillationen ein, die sich, indem sie die Saite in Folge der Drehung abwechselnd verkürzen und verlängern, von den longitudinalen Schwingungen, ausgenommen die Tonhöhe, nur dadurch unterscheiden, dass sie noch unangenehmer klingen und schneller erlöschen, als die durch Längsreibung erregten Töne, zu welch' letzteren sie sich in Bezug auf die Tonhöhe je nach dem Stoffe verschieden verhalten.

So finden wir für die auf C_0 gestimmte, zwei Meter lange Stahlsaite unseres Monochordes den Torsionston im Verhältnisse zu ihrem Längstone um mehr als eine Quinte, jenen der gleich langen und auf denselben Ton gestimmten Messingsaite um mehr als eine grosse Sext tiefer. Der Torsionston der Darmsaite klingt unter gleichen Umständen um eine Octave tiefer.

Mit unserem Harmonium verglichen gibt:

die Stahlsaite den Longitudinalton dis^3+ und den Torsionston gis^2,

die Messingsaite den Longitudinalton gis^2- und den Torsionston h^1,

die Darmsaite den Longitudinalton cis^2+ und den Torsionston cis^1+.

Dass die Longitudinal- wie die Torsionsschwingungen der Saite durch deren Verlängerung und Verkürzung Stösse gegen die festen Stege üben, die von diesen auf die Resonanzplatte weiter verpflanzt werden, analog wie bei den Transversalschwingungen, bedarf keines neuerlichen Nachweises.

Für den Musiker hat die Kenntniss der Längs- wie der Drehungsschwingungen der Saite nur insofern praktischen Werth, als sie Spielern von Streichinstrumenten die grosse Bedeutung einer geregelten Bogenführung auf die Tonbildung klar macht. Denn es leuchtet ein, dass schon im günstigsten Falle in einer, Querschwingungen vollführenden Saite in Folge ihrer Ausbiegungen nothwendig Dehnungen mit folgenden Zusammenziehungen in der Längsrichtung entstehen, daher mit den Transversal- zugleich Longitudinalschwingungen auftreten müssen. Da nun die viel höheren Töne der Längsschwingung mit den unharmonischen Obertönen der Querschwingung,

die sonst infolge ihrer Schwäche verschwinden würden, zusammenfallen so verstärken sie diese ungünstige Partialschwingung und verschlechtern den Klang. Dieser Uebelstand kann bei fehlerhafter, zumal bei schwerfälliger Bogenführung noch vergrössert werden durch das gleichzeitige Auftreten von Torsionsschwingungen, weil ja die Saite durch den stark anhaftenden Bogen auch in der Rotationsebene gezerrt werden kann, wodurch beim Rückschwingen nothwendig Drehungsoscillationen entstehen müssen.

Dagegen bieten die Längs- und Torsionsschwingungen der Saiten ein um so grösseres physikalisches Interesse, besonders die ersteren; denn diese machen es möglich, in einfacher Weise die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in allen Stoffen, die sich in Saitenform bringen lassen, mit hinreichender Genauigkeit in gleicher Weise zu bestimmen, wie wir solches bereits durch Versuche an Stäben und Röhren seinerzeit ausführten.

Weiters eignen sie sich ganz vorzüglich, um die Bewegungsrichtung der die Saite durchlaufenden Wellen ersichtlich zu machen.

Da wir einerseits die Geschwindigkeit kennen, mit welcher der Schall in der Luft fortschreitet (sie beträgt bekanntlich bei 16° C. rund 340 Meter in der Secunde), und andererseits die Schallwelle des Grundtones einer longitudinal erregten Saite gleich sein muss der Länge der Saite, zwischen deren Mitte und den beiden Stegen die Wellen hin- und heroscilliren, und endlich die Spannung ihres geringen Einflusses wegen nicht in Betracht zu kommen hat, so bietet uns die Tonhöhe der Längsschwingung gleich langer und dicker Saiten aus verschiedenem Materiale das Mittel dar, die Schwingungszahl, und mithin die relative Geschwindigkeit zu ermitteln, mit welcher sich der Schall in diesen Materien fortbewegt.

Führen wir einen solchen Versuch an unserem Monochorde mit den drei gleich langen und dicken Saiten aus, deren eine, wie Ihnen bekannt, aus Stahl, die andere aus Messing besteht, während die dritte eine Darmsaite ist. Wir stimmen sie so, dass ihre Querschwingungen das grosse *C* im Einklange hören lassen. — Erregen wir deren longitudinalen Grundtöne, so finden wir die schon zuvor estgestellten Tonhöhen, wonach jene der Stahlsaite einem dis^3+ von 2500 Schwingungen, jene der Messingsaite einem gis^2- von 1600 Schwingungen, jene der Darmsaite endlich einem cis^2+ von 1100 Schwingungen entspricht. Die Wellenlänge des Grundtones jeder

dieser Saiten beträgt zwei Meter, bekanntlich die Länge unseres Monochordes; die Wellenlänge in der Luft dagegen im ersten Falle 136, im zweiten 210 und im letzten 309 Millimeter. Dividirt man nun durch diese Wellenlängen (136, 210 und 309 Millimeter) die Wellenlängen der Saiten (2 Meter), so ergibt sich für die beiden Metallsaiten das schon bei unseren Versuchen mit den Röhren gefundene Resultat, nämlich, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, wenn wir sie für die Luft gleich 1 setzen, im Stahl 14·7 und im Messing 9·5 beträgt, wodurch weiters auch die relative Geschwindigkeit zwischen der im Stahl und Messing, nämlich 14·7 : 9·5 gegeben ist, so dass also der Schall im Stahl $1\,^1/_2$ mal schneller vorwärts kommt, als im Messing. Dieses Resultat weicht von der für das Eisen- und Messingrohr gefundenen Fortpflanzungsgeschwindigkeit (14·9 und 10·75) zwar nur wenig ab, gestattet aber den Schluss, dass das Leitungsvermögen mit dem Querschnitte des Körpers zu- oder abnimmt. In der Darmsaite pflanzt sich der Schall $6\,^1/_2$ mal schneller fort als in der Luft, $1\,^1/_2$ mal langsamer als in der Messing- und $2\,^1/_4$ mal langsamer als in der Stahlsaite. [1])

Was endlich die experimentelle Nachweisung der Schwingungsknoten longitudinal erregter Saiten betrifft, so eignen sich die Papierreiter, wie man sie bei querschwingenden Saiten zu gleichen Zwecken anwendet, hiezu nicht, weil, wie schon angedeutet, die längsschwingende Saite zugleich Querschwingungen vollführt.

Man bedient sich hier zweckmässiger eines mit Blei beschwerten Reiters aus Kork, der, auf die Knotenpunkte geschoben, Querschwingungen nicht zu Stande kommen lässt, daher die longitudinalen Obertöne in voller Reinheit hervorzurufen ermöglicht, wenn die Saite zwischen den Knotenpunkten gerieben wird.

---

[1]) Wollte man mit Saiten aus diesen drei Stoffen das Normal-*a*, dessen Schwingungszahl bekanntlich 870 ist, als Longitudinalton darstellen, so würde für die Stahlsaite eine Länge von 5·74, für die Messingsaite von 3·71 und für die Darmsaite eine Länge von 2·54 Meter erforderlich sein, wie sich dies aus folgender Rechnung ergibt:

$$(870 \times 5{\cdot}74) : 340 = \frac{4998}{340} = 14{\cdot}7$$
$$(870 \times 3{\cdot}71) : 340 = \frac{3230}{340} = 9{\cdot}5$$
$$(870 \times 2{\cdot}54) : 340 = \frac{2210}{340} = 6{\cdot}5.$$

Die Longitudinalschwingungen lassen sich sowohl mit dem Finger fühlen, als auch durch die längs der Saite erfolgenden, charakteristischen Fortbewegungen eines leicht verschiebbaren, schweren Kork- (Fig. 164) oder Drahtreiters ersichtlich machen. Diese Bewegungen stehen mit der Richtung, in der wir die Saite longitudinal streichen, in einem ganz bestimmten Zusammenhange. Befindet sich der Reiter auf jener Saitenhälfte, welche gestrichen wird, so folgt seine Bewegung der Richtung des Striches; bringen wir aber den Reiter auf die andere Hälfte der Saite, so werden seine Bewegungen der Richtung des Striches entgegengesetzt sein.

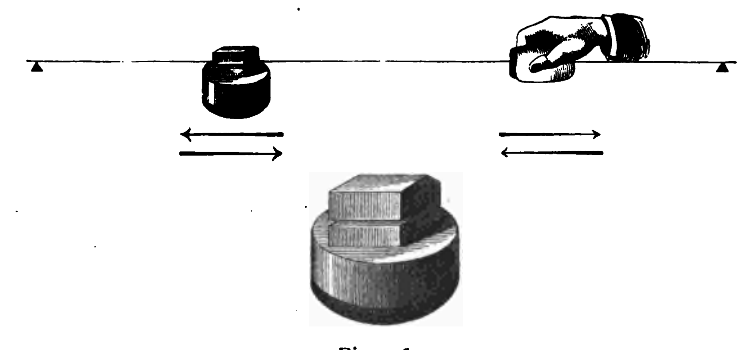


Fig. 164.

Diese Erscheinung ist für die Erkenntniss der molekulären Vorgänge in longitudinal schwingenden Körpern überaus wichtig, denn sie erbringt den directen Nachweis der gegensätzlichen Bewegungsrichtung der Verdichtungen und Verdünnungen von und zu den Knotenpunkten, wodurch die fortlaufenden Wellen zu stehenden werden.

Eine weitere Erscheinung, die bei Hervorrufung des Longitudinalgrundtones der Stahlseite auftritt (die Messing- und Darmsaite lässt sie nicht beobachten), ist das gleichzeitige Mitklingen der Unterseptime (*eis*^{2}) und Unteroctave (*dis*^{2}), wenn die Saite von der Mitte gegen das Ende hin wiederholt mit einem beharzten Läppchen leicht gerieben wird. Der Grund dieser Erscheinung, die Chladny ebenfalls schon kannte, bedarf noch der Erforschung.

Die Saiteninstrumente.

Nachdem wir die Saite hinsichtlich ihrer physikalischen Functionen betrachtet haben, müssen wir nunmehr ihre musikalische Verwendung gleichfalls ins Auge fassen, da wir, als Musiker, den eigentlichen Zweck unserer akustischen Studien doch wesentlich in der Richtung zu suchen haben, in welcher deren Lehren für die Ausübung der Tonkunst von praktischer Bedeutung sind.

Die in der Musik gebräuchlichen Instrumente, deren tönendes Agens die Saite ist, zerfallen, je nachdem die Saite durch Streichen, Schlagen oder Zerren zum Erklingen gebracht wird, in drei besondere Gattungen. Zur vornehmsten dieser Gattungen zählen die Streich- oder Bogeninstrumente schon aus dem Grunde, weil die Dauer und während der vollen Dauer auch die Stärke des Tones ganz in die Willkür des Spielers gegeben ist, während diese Willkür bei den Saiteninstrumenten der beiden anderen Gattungen lediglich auf den ersten Moment der Tonhervorrufung beschränkt ist, und der Spieler mit dem Tone dann weiter nichts mehr vorzunehmen vermag, als ihn früher oder später — und dies auch nur in sehr beschränkter Frist — verklingen zu machen.

Die folgende Gattung umfasst die Instrumente, deren Saiten durch Hammeranschlag zum Tönen gebracht werden. Sie hat, sieht man von dem vielleicht nur noch in Ungarn vorkommenden Cymbal ab, heute einen einzigen, aber mächtigen Repräsentanten, das Clavier. Der dritten Gattung gehören diejenigen Tonwerkzeuge an, deren Saiten vorzugsweise mit dem Hautwulste der Finger oder, wie bei der Mandoline, mittels eines gespitzten Federkieles, endlich wie bei der Zither theilweise mittels eines Drahtstiftes aus der Ruhelage gezogen und durch Loslassen in Schwingung versetzt werden. Der künstlerisch bedeutendste Vertreter dieser Gattung ist die Harfe, ihr folgen, abgesehen von historischen oder ethnographischen Instrumenten, wie Laute (Fig. 165), Theorbe[1]) u. dgl., die Guitarre, die Zither und die Mandoline (Fig. 166).

---

[1]) Zieht man einerseits den aus schwachen Spänen zusammengefügten Bau der, die Familie der Lauten bildenden Instrumente und andererseits die Zugkraft ihrer theilweise zweichörigen Besaitung in Betracht, so erscheint der Ausspruch Mattheson's ganz glaubwürdig, dass: wer 80 Jahre die Laute spielt, 60 Jahre mit dem Stimmen derselben verbringt.

Bezüglich der Stimmung aller dieser Instrumente sei hier blos nebenbei bemerkt, dass sie nicht nur zu verschiedenen Zeiten eine verschiedene war, sondern sehr häufig dem jeweiligen Bedürfnisse des Spielers sich anpassen musste.

Für die wichtigeren Instrumente bestanden indessen im Allgemeinen bestimmte Regeln.

So ist die Stimmung der Violine, Viola und des Violoncells, dann der Mandoline die Quinten-, jene des Contrabasses die Quarten-



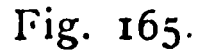


Fig. 165.



Fig. 166.

stimmung. Die Stimmung der Harfe entspricht der diatonischen Durscala. Das Clavier ist bekanntlich chromatisch gestimmt. Die Laute hatte, gleich ihrem vereinfachten Abkömmlinge, der Guitarre, gemischte Quarten- und Terzenstimmung, konnte aber nur theilweise chromatisch gebraucht werden.

In eigenthümlicher Art ist die Stimmung der Zither angeordnet, nämlich so, dass je zwei nebeneinander liegende sogenannte Accordsaiten mit einer dritten einen Dreiklang oder eine seiner Umkehrungen geben, während die sogenannten Melodiesaiten in

Quinten gestimmt sind.[1]) — Uebrigens pflegen Stimmungsänderungen auch in unserer Zeit an Streichinstrumenten zuweilen noch vorzukommen, wie z. B. das Contra-*B* des Violoncells in Schumann's Clavierquartett, dann die Stimmung der g^0-Saite auf a^0, oder der ganzen Violine um einen halben Ton höher, wie in Paganini'schen und Ernst'schen Compositionen.

Betrachten wir die einzelnen Gattungen der gebräuchlichen Saiteninstrumente ein wenig näher.

Die Familie der Streichinstrumente umfasst bekanntlich die Violine, die Altviola, das Violoncell und den Contrabass.[2]) Ihr Tonumfang beherrscht das ganze Gebiet musikalisch brauchbarer Einzeltöne. Es kommen fast ausschliesslich — ich sage fast, denn es werden Violinquinten (*e*) auch aus Seide gemacht — Darmsaiten

---

[1]) Hier einige diesbezügliche Stimmungen:
Früheste Stimmung der Laute:

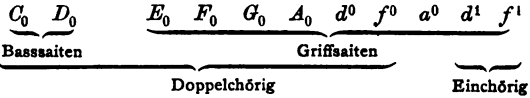
$A \quad B \quad C_0 \quad D_0 \quad E_0 \quad F_0 \quad G_0 \quad A_0$
Unveränderliche Basstöne

$d^0 \quad f^0 \quad a^0 \quad d^1 \quad f^1 \quad a^1$ oder auch $c^0 \quad f^0 \quad a^0 \quad d^1 \quad g^1$
Griffsaiten

Lautenstimmung nach Hans Gerle 1533:

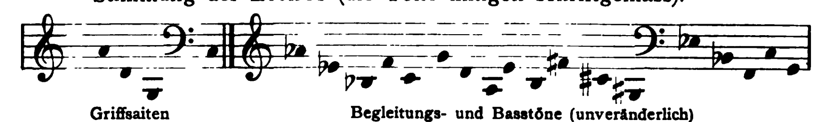
$A \quad B \quad C_0 \quad D_0 \quad E_0 \quad F_0 \quad G_0$ (Basssaiten) $\quad A_0 \quad d^0 \quad g^0 \quad h^0 \quad e^1 \quad a^1$ (Griffsaiten)

Lautenstimmung nach Ernst Gottlieb Baron 1727:

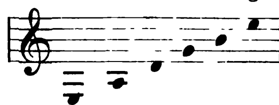


Zusammen 11 Chöre mit 20 Saiten.

Stimmung der Zither (die Töne klingen schriftgemäss).



Stimmung der Guitarre (die Töne klingen um eine Octave tiefer):



[2]) Auch die sogenannte Rad-, Bauern- oder Savoyardenleier (Fig. 167) kann hierher gezählt werden, deren Saiten statt mit dem Bogen, durch Reibung mittels einer rotirenden Scheibe (*r*) in transversale Schwingungen versetzt werden.

zur Verwendung, von welchen die, für die tieferen Töne bestimmten mit Metalldraht übersponnen werden, um sie bei gleicher Länge schwerer zu machen und dadurch ihre Schwingungen zu verlangsamen, ohne ihre Biegsamkeit durch eine zu grosse Masse zu beeinträchtigen.

Die Spannungen der Saiten sind relativ grosse; sie betragen, je nach der Stärke der Besaitung bei der Violine 29—30, bei der Viola 30—31, bei dem Violoncell 44—45 und beim Contrabasse 200—220 Kilogramme.

Die Uebertragung der Schwingungen der Saite auf die Holzflächen des Geigenkörpers und mittelst dieser auf den von ihnen um-

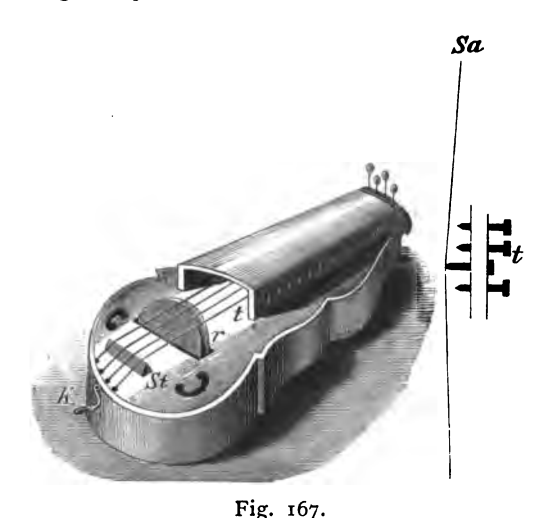


Fig. 167.

K Kurbel, *St* Steg, *r* Rad (Scheibe), *t* Tasten, *Sa* Saite.

schlossenen Luftraum erfolgt in der Weise, dass die Erschütterungen, vom Stege (Sattel) aufgenommen, der Deckplatte und von dieser mittels des, Decke und Boden verbindenden Stimmstockes auch den letzteren mitgetheilt werden. Die Erschütterungen der beiden Holzplatten nun setzen einmal die äussere umgebende Luft in Schwingung und zwingen zugleich die von ihnen umschlossene Luftmasse zur Resonanz. Dadurch werden die Töne, welche entweder mit dem Eigentone, den diese Luftmasse gleich jedem mit der Luft communicirenden Hohlraume besitzt, oder mit einem seiner Obertöne ganz oder nahe zusammenfallen, verstärkt. Ausserdem aber hängt von diesem Resonanzraume, seiner Form und seiner Verbindung mit der

Aussenluft mittelst der sogenannten F-Löcher wesentlich die Schönheit, Fülle und Charakteristik des Tones ab, wenngleich auch andere Umstände, wie: Material, Firniss und hauptsächlich die zur Hervorbringung regelmässiger und möglichst ausgebreiteter Schwingungen erforderliche Erfahrung, Kunst und Sorgfalt in der Ausarbeitung der Platten, insbesondere der Decke, nicht weniger zur Ausbildung des Tones beitragen.

Dass selbst die bestgearbeiteten Streichinstrumente, zumal wenn sie noch neu sind, einzelne Töne enthalten, die den übrigen an Fülle oder Reinheit des Klanges nachstehen, und in der Regel auch schwerer ansprechen, erklärt sich daraus, dass in der Klangplatte, die ja den Schwingungen aller auf dem Instrumente möglichen Töne sich anpassen muss, gewisse Stellen vorkommen können, deren Molekularverhältnisse sich dieser Anpassung nur widerstrebend fügen. Bei gut gearbeiteten Instrumenten, wenn sie viel und richtig gespielt werden, pflegen solche Fehler mit der Zeit zu weichen.

Der Eigenton der Violine hängt von dem Formate und der Höhe des Körpers (Corpus) ab. Bei Violinen in Formaten nach Guarnerio oder Stradivario liegt der Eigenton der inneren Luftmasse zwischen c^1 und cis^1; bei Formaten nach Maggini und Steiner ist er tiefer. Man constatirt diesen Luftton am bequemsten durch leichtes Klopfen auf die Decke mittelst eines Filzhammers.

Der Bau der Violen, Violoncelle und Contrabässe ist in der Hauptsache von jenem der Violinen nicht verschieden; denn sie sind lediglich Vergrösserungen der letzteren. Diese Vergrösserungen stehen jedoch nicht in einem, mit den Stimmungsunterschieden übereinkommenden Verhältnisse. Bekanntlich differiren die Stimmungen der Geige und der Viola um eine Quinte, die der Viola und des Violoncells um eine Octave; ein nahezu gleicher Unterschied besteht zwischen Violoncell und Contrabass. Demnach sollte der Luftton des Violakörpers eine Quinte tiefer als der der Violine, nämlich gleich dem *f* der kleinen Octave klingen. Dies ist nicht der Fall, denn der Luftton der Viola liegt meistens zwischen dem *a* und *b* der kleinen Octave, also nur um 1 bis $1^1/_2$ Töne tiefer, als der der Violine. Aus diesem unzureichenden Resonanzraume erklärt sich der eigenthümliche, näselnde Ton der Viola. Der Corpus des Violoncells wie des Contrabasses ist in der Länge viel geringer, als es den Verhältnissen ihrer bezüg-

lichen Tonlage gemäss sein sollte. Diese im Interesse der leichteren Spielbarkeit gebotene Beschränkung wird durch die Höhe der Zargen nahezu ausgeglichen, so dass der Luftton, der für das Violoncell theoretisch dem grossen F_0 und für den Contrabass dem Contra F_1 entsprechen soll, auch grösstentheils erreicht wird.

Die Resonanzräume jener Instrumente, deren Saiten durch Zerrung in Schwingung gesetzt wurden, besitzen, je grösser diese, ihre Räume sind, um so weniger Eigenton, da die communicirenden Oeffnungen zwischen der inneren und äusseren Luft zu gross sind, um stehende Schwingungen des, zu diesem Zwecke nicht genügend begrenzten Luftvolumens zu ermöglichen. Es tritt also hier kein Mittönen, sohin auch keine Verstärkung der einzelnen Töne ein; dem Resonanzraume fällt nur die — man könnte sagen — allgemeine Aufgabe zu, die, von der Unterfläche der schwingenden Resonanzplatte ausgehenden und von der Bodenplatte reflectirten Schallstrahlen zu concentriren und an die Aussenluft abzugeben.

Der Factor, dass diese Luftresonanz, die schon bei der Harfe nahezu aufhört, einen Einfluss auf die Charakteristik wie Dynamik des Tones nehme, entfällt beim Klavier vollständig.

Ist bei der Harfe die Resonanzplatte von einem Hohlraume noch theilweise umschlossen, so liegt die Resonanzplatte des Klaviers vollständig frei — wie dies insbesondere bei den sogenannten »Lisztklavieren« der Bösendorfer'schen Fabrik der Fall ist, die sich bekanntlich durch grosse Tonfülle auszeichnen — und diese Platte allein gibt die von der schwingenden Saite empfangenen Impulse unmittelbar an die Luft ab.

Ueberhaupt kommt es bei Resonanzplatten aller Saiteninstrumente, welches auch der Eigenton der Platte sein möge, wesentlich darauf an, dass dieser Eigenton, zumal dort, wo der Factor eines resonirenden Luftraumes fehlt, möglichst tief und daher fähig sei, durch jeden Ton in entsprechende Mitschwingung versetzt zu werden. Man nennt diese Function die erzwungene Resonanz, zum Unterschiede von jener natürlichen, die in der Verstärkung der, dem Eigentone der Resonanzplatte oder einem seiner Theiltöne entsprechenden Klänge beruht. Wir werden Gelegenheit haben, das Wesen der erzwungenen Resonanz auf experimentellem Wege eingehender kennen zu lernen.

Dass die Saite in Folge ihrer geringen Oberfläche, mit der sie die Luft in Bewegung zu setzen vermag, an und für sich nahezu keinen Ton hören lässt, haben wir aus früheren Versuchen erfahren. Um hörbare Töne zu geben, muss sie ihre Schwingungen auf grössere Flächen übertragen können. Dies geschieht, indem man sie mit einem sogenannten Resonanzboden in geeignete Verbindung bringt. Von diesem geht die ganze Klangmasse des Instrumentes aus, und auf ihn die Schwingungen der Saiten möglichst vollständig zu übertragen, bildet eine der wesentlichsten akustischen Aufgaben des Klavierbaues.

Die vielen Veränderungen, die im Laufe der Jahrhunderte das Wesen wie die Form dieses, heute die Welt beherrschenden Instrumentes erfuhren; wie aus dem Tangenten- und Federkiel-Clavichord, dessen zirpende Klänge der »abendlichen Stille« bedurften, um vernommen werden zu können, allmälig die eisenverspreizten Concertklaviere sich herausbildeten, die mit ihren gewaltigen Glockentönen die grössten Saalräume beherrschen; welche Summen von Fortschritten zwischen der, den Ton erzeugenden Abgrenzung der schwachen, zwirnfadendünnen Messingsaite mittels des anschlagenden Metallplättchens und der englischen Stosszungenmechanik liegt, die die befilzten Hämmer mit grosser Schnellkraft an Dreichöre starker Gussstahlsaiten anprallen macht, deren Gesammtspannung einer Zuglast von beiläufig 110—115 Metercentnern gleichkommt, welcher der Rahmen des Instrumentes einen beständigen und unnachgiebigen Widerstand zu leisten hat; — welches endlich die einzelnen Bestandtheile und zu welchen Zwecken sie bestimmt sind, nach welchen Gesetzen sie hergestellt werden müssen, welche Verhältnisse die Stärke und Spannung der Saiten und des Resonanzbodens, das Gewicht der Hämmer, die Drehungs- und Anschlagspunkte der Mechanik u. s. w. haben müssen, um bezüglich des Tones wie der Spielart die günstigsten Ergebnisse zu liefern —, bezüglich aller dieser Fragen, die schon überwiegend theils in das Gebiet der Geschichte theils in jenes der Technologie des Instrumentenbaues fallen, muss ich Sie auf die einschlägige, reichhaltige Literatur verweisen. Wollen Sie aber von all' diesen ganz richtige Vorstellungen bekommen, dann empfehle ich Ihnen, gleich wie ich es gethan, sich überdies in den Werkstätten der Instrumentenbauer umzusehen. Man weiss daselbst müssige Neugierde von strebsamer Wissbegierde wohl zu unterscheiden, und ist in der Regel gerne bereit, der letzteren Vorschub zu leisten. Bezüglich

der Harfe will ich nur noch bemerken, dass sie das einzige heute gebräuchliche Instrument mit feststehenden Tönen ist, das eine enharmonische Scala in dem Sinne besitzt, dass die meisten ihrer Töne in zweierlei Weise erzeugt werden können. Eine wirkliche enharmonische Scala, in welcher die Halbtöne, je nachdem sie durch Erhöhung oder Vertiefung entstehen, in der Tonhöhe, beziehungsweise in den Schwingungszahlen verschieden sind, ist diese Scala jedoch keineswegs und kann sie schon aus dem Grunde nicht sein, weil das Instrument überhaupt nach der temperirten Stimmung eingestimmt werden muss, gleichviel, ob hiezu die erhöhten oder vertieften Töne benützt werden, und weil die Töne der diatonischen Scala, ohne das ganze Instrument aus der Stimmung zu bringen, unberührt bleiben müssen, was offenbar nicht der Fall wäre, wenn *fes*, *eis*, *ces*, *his* nicht genau mit *e*, *f*, *h*, *c* übereinstimmten.

Ein enharmonisches Instrument würde die Harfe nur dann sein, wenn die auf derselben darstellbaren, aus der die Beilage V bildenden Tabelle ersichtlichen Dreiklänge paralleler Kreuz- und *B*-Tonarten, wie:

B und *Ais*-moll,
As » *Gis*-dur und -moll,
Ges » *Fis*-dur,
F » *Eis*-moll,
Fes » *E*-dur,
Es » *Dis*-moll,
Des » *Cis*-dur und moll,
Ces » *H*-dur

verschiedene Tonhöhen hätten. Eine solche Harfe aber wäre ein im Orchester unbrauchbares, weil verstimmtes Instrument. Ausserdem fehlen der Harfe, um ein enharmonisches Instrument zu sein, die kommatischen Töne für *d*, *g* und *a*, beziehungsweise die Vorrichtung, um dieselben darstellen zu können.

Und damit nehmen wir von der Saite Abschied, um uns im nächsten Vortrage mit der tönenden Luftsäule zu befassen.

25. Vortrag.

(Luftsäulen.)

Wir haben das letztemal die Lehre von den Functionen der Saite zum Abschlusse gebracht und wollen uns jetzt der Betrachtung der, in Bezug auf ihre Wichtigkeit und künstlerische Verwendung der Menschenstimme und der Saite zunächst anzureihenden Tonquelle, der schwingenden Luftsäule, zuwenden. Auf ihr beruhen die Orgelpfeifen, zumal die Labialpfeifen und die ganze Gruppe der Blasinstrumente im engeren Sinne, ausserdem Signal- und sonstige Pfeifen, die Panflöte (Fig. 168) (seit der Zauberflöte auch »Papagenopfeife« genannt), der Brummkreisel, die durch Wärme tönenden Röhren, endlich ein, der modernen Akustik unentbehrlicher Experimentalbehelf, die Resonatoren. — Weder die Form noch das Material der Wände, welche den, ein Luftquantum begrenzenden Hohlraum umschliessen, üben auf die Bildung der, die Entstehung eines Tones überhaupt bedingenden, stehenden Welle selbst irgend welchen Einfluss. Selbstverständliche Bedingung ist hierbei nur, dass die Wände starr und glatt sind.

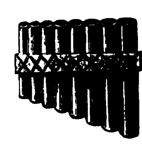


Fig. 168.

Ein durch eine Mauer gebohrtes cylindrisches oder konisches Loch, mit einem passenden Horn- oder Trompetenmundstück angeblasen, gibt genau dieselben regelmässigen Töne, wie ein Rohr von gleicher Länge und Weite aus was immer für einem anderen Stoffe. Worauf es wesentlich ankommt, dass sich in einem abgegrenzten Luftraume stehende Schwingungen bilden können, ist das Verhältniss zwischen Weite und Länge des umschlossenen Luftvolumens. Nur wenn diese Verhältnisse mindestens gleich sind, also einer Form entsprechen, die zwischen einem Würfel und einem diesem gleich hohen Cylinder variirt, kann die abgegrenzte Lufmasse zum Tönen gebracht werden, folglich um so leichter, je mehr die Länge überwiegt.

Hieraus fliesst die Folgerung, dass die Tonhöhe mit diesem Verhältnisse nothwendig im Zusammenhange stehen müsse, denn, sobald es zur Bildung einer stehenden Welle kommt, muss die Welle auch eine bestimmte Länge haben, die offenbar nur den Dimensionen der schwingenden Luftsäule entsprechen kann. Eine Luftsäule von einer gewissen Länge und Weite wird also unter gleichen Umständen,

nämlich, dass entweder die Erregungsweise dieselbe bleibt, oder, was dasselbe besagt, jedesmal derselbe Theilton, beispielsweise der Grundton, in Betracht kommt, stets denselben Ton geben.

Der Einfluss, welchen das die Luftsäule umschliessende Material übt, äussert sich lediglich in der Qualität des Tones, d. h. in dem, was man Klangfarbe nennt. Im Allgemeinen ist der Einfluss dieses Factors jedoch kein bedeutender. Sobald die Wände die hinlängliche Stärke besitzen, um den, von den Vibrationen der Luftsäule ausgehenden Erschütterungen entsprechenden Widerstand zu leisten, schrumpft der charakteristische Unterschied auf ein Minimum ein. Innerhalb der Grenzen des nothwendigen geringsten und des absolutesten Widerstandes der Wände trägt jedoch das mitoscillirende Material zur Bildung der Klangfarbe immerhin bei. Die Factoren, die den überwiegenden Antheil an der Herstellung der Klangfarbe haben, werden später in Betracht kommen.

Wir können Luftsäulen abgrenzen durch Metalle, Glas, Holz, Steine, Pappe; die Tonhöhe wird in allen Fällen bei gleichen Dimensionen stets dieselbe bleiben.

Die Form dieser Begrenzung kann ebenfalls eine sehr mannigfaltige sein, je nachdem wir dem Querschnitte die Gestalt des Kreises oder eines Rechteckes, dem Längenschnitte jene eines Cylinders oder Kegels, eines prismatisch oder pyramidenartig verlaufenden Kanales, oder jene eines Würfels oder einer Kugel geben, und je nachdem wir die Längen dieser Säulen bis an ihr Ende ihrer Form gemäss verlaufen lassen, oder diese Begrenzung verengen oder erweitern, kegel- oder trichterförmig gestalten, welch' letzteres bei allen Blasinstrumenten mehr oder weniger der Fall ist.

Wie alle tönenden Körper leichter in Schwingung gerathen, je mehr eine Dimension die anderen überragt, so auch die Luftsäule. Je öfter ihr Durchmesser in ihrer Länge enthalten ist, um so leichter wird sie zum Tönen gebracht. Man nennt dieses Verhältniss zwischen Länge und Durchmesser Mensur, und wird hievon weiters die Rede sein. Nach den Erfahrungen muss die Länge einer Luftsäule mindestens das Zwölffache ihres Querdurchschnittes betragen, wenn sich die Schwingungszahlen umgekehrt wie die Längen verhalten, die Tonhöhen also diesen proportional sein sollen. Diesem Verhältnisse entsprechen die meisten Blasinstrumente und Orgelpfeifen. Pfeifen von gleicher Länge, deren Querdurchschnitte wachsen, oder, wie man

sich technisch ausdrückt, deren Mensur weiter wird, oder Pfeifen, welche kegel- oder pyramidenförmig verlaufen, vertiefen sich mehr und mehr im Tone. Umgekehrt werden verkehrt pyramiden- oder kegelförmige Pfeifen im Tone höher. Auch das Verhältniss der Breite zur Tiefe gleich weiter, rechteckiger Pfeifen hat Einfluss auf die Tonhöhe, ebenso die Breite des Labiums und die Tiefe der demselben gegenüberstehenden Pfeifenwand. So werden, wenn wir für vorliegenden Fall die Form der Pfeife 1 in Figur 169 als die Normalform annehmen, die Pfeife 3 und 4 mit doppelter Breite tiefer klingen, und zwar wenn das Labium (wie bei 3) sich an der breiten Seite befindet, um einen halben Ton, und wenn das Labium (wie bei 4) an der schmalen Seite angebracht ist, um eine kleine Terz. Einen gleichen Tonhöhenunterschied lassen die beiden gleich langen, an den entgegengesetzten Enden labiirten, pyramidenförmig verlaufenden Pfeifen (2 und 5) erkennen.



Fig. 169.

Pfeifen von durchaus gleichem cylindrischem oder rechteckigem Querschnitte vertiefen sich bei einer Länge von achtfacher Breite im Tone um eine Terz, bei vierfacher um eine Quinte, bei einfacher um mehr als eine Octave.[1]) Bei solchen Dimensionen spricht schon der Grundton immer schwieriger und mühsamer an; Obertöne kommen gar nicht zustande, weil die Luftsäule zu kurz und dadurch unfähig wird, sich in schwingende Theile zu zerlegen. Dagegen wächst, ein je grösseres Vielfaches des Querschnittes die Länge bildet, d. h. je enger die Mensur wird, umsomehr die Geneigtheit der Säule, Partialschwingungen zu vollführen, zugleich aber auch die entgegengesetzte Schwierigkeit, den Grundton der Säule hervorzurufen.

Wie nun entsteht der Ton dieser Luftsäulen? Wie werden ihre Schwingungen eingeleitet und unterhalten, und welche Gesetze befolgen diese Schwingungen?

[1]) Man kann einen diesbezüglichen Versuch mit vier gleich langen, gedeckten Glasröhren anstellen, deren Querschnitte zunehmende Vielfache der engsten Röhre sind. Je weiter die Röhre, um so tiefer der Ton. Um also mit zwei Röhren verschiedener Weite zwei gleich hohe Töne hervorzubringen, muss die engere Röhre länger sein.

Dass sich eine Luftsäule nicht, gleich einer Saite, in transversale Schwingungen versetzen lässt, leuchtet sofort ein. Sie kann nur in der Richtung Bewegungen vollführen, in welcher sie mit der Aussenluft in Verbindung steht; ihre einzig mögliche Schwingungsart ist die der Längsschwingung. Ebenso leuchtet ein, dass keines der Mittel, die wir anwendeten, um eine Saite in Schwingungen zu versetzen, wie: Streichen, Zerren, Schlagen, Reiben, Drehen, hier zum Ziele führen könne, denn die Luftsäule entzieht sich jedem solchen Angriffe.

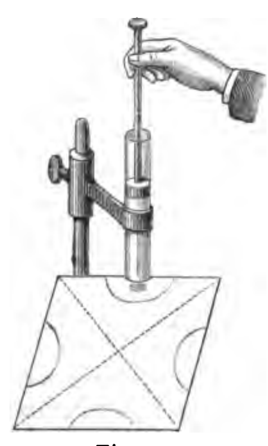
Wie leiten wir die Längsschwingungen ein? Erinnern wir uns, dass die Luft ein eminent elastischer Körper ist, der sich zwar nicht biegen und drehen, weil in keine selbstständige Form bringen, wohl aber, wenn von einem unnachgiebigen Hohlraume umschlossen, auf ein kleineres Volumen zusammenpressen lässt. Es ist also der Druck, gegen welchen die Luftmolecüle ungemein empfindlich sind und dem sie den ganz gleichwerthigen Widerstand entgegensetzen. Die Reaction gegen die, durch den Druck verursachte Zusammendrängung der Molecule, welchen Zustand man als Verdichtung bezeichnet, äussert sich, sobald der Druck aufgehoben wird, in dem Bestreben der verdrängten Theilchen, in ihre vorige Lage zurückzukehren. Da aber hinter jedem zurückschwingenden Theilchen momentan ein verdünnter Raum entsteht und so lange besteht, bis in denselben das nächste Theilchen nachrückt, so wird diese Ausgleichung einen der Verdichtung entgegengesetzten Zustand, den man Verdünnung nennt, hervorrufen, der mit dem Verdichtungsprocesse vollkommen gleiche Dauer hat.[1] Die in ihre ursprüngliche Lage zurückgekehrten Theilchen gelangen, wenn sie auch über diese Lage um ein Weniges hinausschwingen, sofort zur Ruhe, in welchem Zustande sie bis zu einem neuerlichen Druckimpulse verharren. Aus diesem Vorgange erklärt es sich, warum Luftsäulen im Gegensatze zu transversal schwingenden Tonquellen, wie Saiten, Stäbe, Platten, Membranen, Ringe, Glocken etc., augenblicklich aufhören zu tönen, sobald die erregende Ursache selbst zum Stillstande gelangt. Nur in sehr grossen Pfeifen, wie die tiefsten Töne der 16 füssigen Octave sie erfordern, hört der Klang nicht sofort mit dem Ventilschlusse auf, sondern

[1] Die Folge von Verdünnung auf Verdichtung lässt sich mittels einer feuchten Cigarettenhülse nachweisen. Sendet man durch dieselbe einen Luftstoss, so wird sie im Momente der Verdünnung vom überwiegenden äusseren Luftdrucke zusammengepresst.

lässt sich ein echoartiger Nachklang vernehmen, zu dessen Entstehen nebst localen Ursachen wohl auch der Stoss des schliessenden Ventiles auf die Luftsäule der Pfeife Einiges beitragen mag.

Die erwähnten Druckimpulse, die, will man die Luftsäule in dauernder Vibration erhalten, aus eben erwähntem Grnnde ebenso rasch aufeinander folgen müssen, wie die Schwingungen des hervorzurufenden Tones, werden die Form von mehr oder weniger intensiven, continuirlichen, periodischen Stössen oder Erschütterungen annehmen, die in verschiedener Weise hervorgebracht werden können.

Trommeln wir leise mit den Fingern an der Wand einer beiderseitig offenen Papprōhre, so werden wir einen Ton vernehmen. Das Gleiche wird erfolgen, wenn wir die Rōhre mit einem darübergeschobenen Deckel verschliessen und entweder wieder an der Wand oder auf dem Verschlusse trommeln. Diese leisen Erschütterungen genügen, um eine tönende Bewegung der Luftsäulen zu bewirken. Ziehen wir den Deckel rasch ab, oder schlagen wir mit der flachen Hand etwas stärker auf ein Ende der Rōhre, so werden wir dieselben Tōne, wie im vorigen Fall, bekommen, nur werden sie entsprechend der grösseren Energie, mit der wir die Bewegung der Luft säule einleiteten, lauter sein.


Fig. 170.

Halten wir über eine, an einem oder an beiden Enden offene Rōhre eine schwingende Stimmgabel, deren Ton mit jenem unserer Rōhre übereinstimmt, so werden genau dieselben Tōne, wie zuvor, erscheinen. Zugleich tritt aber der neue Umstand hinzu, dass nun der Rohrton in Folge der andauernden Erregung durch die, längere Zeit hindurch währenden Schwingungen der Gabel genau so lange anhält, als diese schwingt. Dasselbe Resultat erlangen wir, wenn wir die Rōhre über eine schwingende Platte halten, deren Ton mit jenem der Rōhre übereinstimmt (Fig. 170).

Interessant hiebei ist die gleichsam explosive Art, wie sich in beiden Fällen der richtige Ton der Rōhre ankündigt, wenn wir diese während des Klingens der Gabel oder Platte abwechselnd verlängern und verkürzen. Einer gleichen Erscheinung sind wir schon im fünften

Vortrage begegnet, als wir eine Resonanzröhre durch Hebung und Senkung des Wasserniveaus verkürzten oder verlängerten (vergl. Fig. 49).

Wenn wir mit der Platte operiren und auf das Schwingungsmaximum derselben, über welchem wir die Röhre halten, ein wenig Lycopodium (Bärlappsamen) streuen, so wird es sich unter der Röhre zu einem Häufchen sammeln, so lange der Rohrton und Plattenton nicht im Einklange sind; sobald aber dieser hergestellt ist, wird das Häufchen durch die Bewegung der Luft in der Röhre hinweggeblasen und es bleibt nur ein Staubring von der Grösse des Querschnittes der Röhre zurück. Diese Erscheinung vermag auch einen Tauben in den Stand zu setzen, die dem Plattentone entsprechende Länge der Röhre zu bestimmen.

Lassen wir an die Stelle der Platte oder Gabel einen bandförmigen Luftstrom treten, den wir knapp an einem Ende des offenen, oder an dem offenen Ende der einseitig gedeckten Röhre quer über die Oeffnung senden, so rufen wir auch auf diese Weise unsere früheren Töne hervor, diesmal aber am lautesten, oder, je nach wechselnder Heftigkeit der Luftströmung, mit wechselnder Stärke und mit unbeschränkter, weil von der, in unserer Willkür liegenden Dauer des Luftstromes abhängiger Stetigkeit.

Diese letzte Art, eine Luftsäule in Schwingung zu versetzen, ist die einzige praktisch gebräuchliche, um die, die Familie der Flöten bildenden Tonwerkzeuge erklingen zu machen, wohin alle Gattungen Orgelpfeifen, mit Ausnahme der, Zungen- oder Rohrwerke genannten, dann unter den Blasinstrumenten die Querflöte und das Piccolo, endlich die sogenannte Panpfeife und alle Gattungen kleiner Pfeifchen, sowie die Dampfpfeife zählen.

Die soeben vorgenommenen Experimente belehren uns unzweifelhaft über die wichtige Thatsache, dass der Ton unserer Röhre, in welcher Art wir diesen auch hervorrufen mögen, stets derselbe bleibt, dass wir es also mit einem Eigentone der Luftsäule, beziehungsweise der sie umschliessenden Röhre zu thun haben. —

Bei allen bisher versuchten Erregungsarten sind wir der übereinstimmenden Erscheinung begegnet, dass der Ton unserer beiderseitig offenen Röhre durch das Verschliessen einer dieser Oeffnungen

um das Intervall einer Octave vertieft wurde. Wir schliessen hieraus, dass die Luftsäule im letzteren Falle um die Hälfte langsamer schwingt. Da nun einerseits weder an den Dimensionen der Röhre noch an der Erregungsart etwas geändert wurde, und weil wir mittels der beiden ersten Erregungsarten weder einen höheren, noch durch irgend eine sonstige Erregungsart einen tieferen Ton hervorzurufen im Stande sind, wir es also in beiden Fällen mit dem Grundtone der Säule zu thun haben; und da andererseits, wie wir wissen, die Tonhöhe von der Länge der Schallwelle abhängt, diese aber unter sonst unveränderten Verhältnissen mit der Länge des schwingenden Körpers zu- oder abnimmt, so müssen wir annehmen, dass die Schallwelle in der gedeckten Röhre einen doppelt so langen Weg, als in der offenen, oder in der letzteren einen halb so langen, als in der gedeckten, zurückzulegen hat.

Man kann demnach unter gewissen, später zu erwähnenden Einschränkungen die Länge einer offenen Röhre (L) mit der Wellenlänge (λ) ihres Grundtones gleich setzen ($L = \lambda$ oder $\lambda = L$). Die Länge einer gedeckten Röhre (L_1) wird daher einer halben Wellenlänge ($^1/_2\,\lambda$) ihres Grundtones entsprechen, oder diese Wellenlänge wird gleich sein der doppelten Länge der Röhre ($L_1 = {}^1/_2\,\lambda$ oder $\lambda = 2\,L$).

Da nun die Schwingungszahlen sich umgekehrt verhalten wie die Wellenlängen, so liefern Röhren ein bequemes, wenn auch aus seinerzeit zu erörternden Gründen den Anforderungen an grosse Genauigkeit minder entsprechendes Mittel zur Bestimmung der Schwingungszahl eines Tones.

a

Fig. 171.

Den Beweis, dass Röhren den eben entwickelten Gesetzen folgen, sollen einige Experimente liefern.

Wenn wir eine, in der Mitte theilbare, an beiden Enden offene Röhre (Fig. 171) ihrer Gänze nach anblasen, so erhalten wir einen bestimmten Ton, den wir mit x bezeichnen wollen. Schalten wir zwischen die beiden Theile ein, die Oeffnung abschliessendes Scheibchen (Fig. 171 a) ein und verbinden wieder die beiden Theile, so

wird jeder Theil für sich genau denselben Ton hören lassen, was also beweist: einmal, dass die beiden Theile vollkommen gleich sind, und dass, da wir durch die Einschiebung des Scheibchens zwei gedeckte Röhren herstellten, eine gedeckte Röhre denselben Ton gibt, wie eine doppelt so lange offene. Nehmen wir die beiden Rohrtheile wieder auseinander und blasen jeden für sich an, so werden beide denselben Ton geben, der jedoch jetzt um eine Octave höher ist als x, was beweist, dass die Luftsäule dem Theilungsgesetze der Saite folgt, wo ebenfalls die Halbirung die höhere Octave erzeugt.

Wenn wir beide Hälften anblasen, die eine aber decken, so wird die gedeckte Röhre die tiefere Octave der offenen hören lassen. Offenbar werden wir also auch die nächsttiefere Octave hervorbringen, wenn wir beide Röhrentheile zu einer einzigen offenen Röhre verbinden und diese an einem Ende verschliessen. [1])

Dass aber von zwei gleichlangen Röhren, deren eine offen, die andere gedeckt ist, letztere die Hälfte der Vibrationen der ersteren thatsächlich vollführt, zeigt Ihnen das folgende Experiment (Fig. 173).

Die von diesen beiden Pfeifen ausgehenden, auf die manometrischen Flammen [2]) wirkenden Vibrationen erscheinen, im rotirenden Spiegel gesehen, als eine Reihe übereinander stehender Zacken, von welchen das der offenen Pfeife angehörende Flammenbild die doppelte Zahl erkennen lässt. Oeffnet man den Verschluss der gedeckten Pfeife, so wird die Zackenzahl beider Flammenbilder die gleiche sein. Hiebei sei an das, mit zwei tönenden Flammenröhren im 15. Vortrage vorgeführte Experiment (vergl. Fig. 125) erinnert.

Fig. 172.

Bisher haben wir unsere Röhren in der Art angeblasen, dass wir entweder mit dem Munde oder mittels einer entsprechend geformten Anblasespalte (s. Fig. 144 im 19. Vortrage) über ein offenes Ende der Röhre einen bandförmigen Luftstrom hinwegstreichen liessen.

---

[1]) Eine, in der Mitte ihrer Länge mittels eines querdurch beweglichen Schiebers abschliessbare offene Pfeife (Fig. 172) gestattet gleichfalls die eben demonstrirten Beweisführungen, wenn auch nicht in so allseitig erschöpfender Weise.

[2]) Die Construction der manometrischen Kapsel wurde bereits gelegentlich der Erklärung des Vocalflammenanalysators (29. Vortrag, Fig. 148) beschrieben.

Diese für manche Versuche zweckmässige Art, die Luftsäule in Schwingungen zu versetzen, eignet sich für die praktischen Zwecke der Musik jedoch deshalb weniger, weil sie unbequem und ausserdem nicht im Stande ist, der Röhre den vollsten Klang, dessen diese fähig ist, abzugewinnen. Letzteres wird nur dann der Fall sein, wenn der Theil der Röhre, welcher von dem Luftbande getroffen wird, eine scharfe Kante oder Schneide bildet und deren Richtung mit jener des Luftbandes in gleicher Ebene liegt.



Fig. 173.

Hiezu nun eignet sich am zweckmässigsten jene Anblasevorrichtung, wie sie bei den sogenannten Labial- oder Lippenpfeifen vorkommt, die bekanntlich die Hauptklangmasse der Orgel bilden. Diese Vorrichtung, die man den Pfeifenmund (Fig. 174 *a* — *o*) nennt und die in der Regel mit der anzublasenden Klangröhre (*F*) fest verbunden ist, besteht aus folgenden Theilen, die Sie aus diesem Durchschnitte einer Orgelpfeife ersehen, welche Sie schon im 14. Vortrage (Fig. 110) flüchtig kennen lernten und die wir jetzt eingehender betrachten wollen.

Der untere, durch *b*, *c* und *d* gebildete Theil, in dessen Hohlraum (*a*) durch ein Ansatzrohr (*e*) der Wind zugeführt wird, heisst der Pfeifenfuss. Dessen obere Ebene (*b*), der Kern genannt, lässt gegen die Röhre zu nur eine enge Spalte (*c*), die sogenannte Kernspalte, frei, bei welcher der im Fusse angesammelte Wind in Form eines dünnen, bandartigen Strahles ausströmen kann. Nun folgt die in der Röhre selbst, durch Ausscheiden derselben gebildete, meist rechteckige, der Aufschnitt genannte Oeffnung (*to*), deren Breite und Höhe je nach dem Toncharakter, den man erzielen will, sehr verschieden sein kann, und auch mit der Grösse der Pfeife in bestimmten Verhältnissen steht. Der obere, zugeschärfte Rand dieses Aufschnittes heisst die Oberlippe oder das Oberlabium (*o*) im Gegensatze zu dem, die äussere Abgrenzung der Kernspalte bildenden, auch Unterlabium genannten Vorschlag (*d*), Bezeichnungen, die wir, wiewohl die Functionen dieser Theile mit jenem der menschlichen Lippen eine äusserst fragliche Analogie aufweisen, beibehalten wollen, weil sie in der Orgelbaukunst eingebürgert sind.

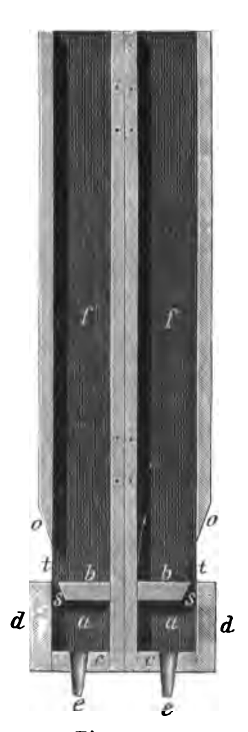


Fig. 174.

In gleicher Weise werden nicht nur alle, zu sonstigen Zwecken dienenden Pfeifen und Pfeifchen, die gleich den Orgelpfeifen nur zur Hervorbringung eines und desselben Tones bestimmt sind, mittels einer solchen unveränderlichen Anblasevorrichtung zum Tönen gebracht, sondern man kann auch damit mit Tonlöchern versehene, zur Erzeugung einer Reihe verschiedener Töne bestimmte Röhren anblasen, wie dieses bei früher üblichen Instrumenten, der Flûte-à-bec und der, auch Csakan genannten Stockpfeife, dann den unter dem Volke noch heute gebräuchlichen Schwegel- oder Hirtenpfeifen der Fall ist.[1])

[1]) Diese, übrigens grösstentheils bekannten Instrumente werden demonstrirt.

Nur bei der Querflöte und ihrem Miniaturabbilde, dem Piccolo, wird das Anblaseluftband direct mittels der Lippen des Mundes gebildet. Der Künstler erlangt dadurch, dass er dem Luftstrome eine wechselnde Richtung gegen die Kante des Mundloches, sowie eine wechselnde Breite geben, auch das Mundloch mit der Oberlippe mehr oder weniger decken kann, das Mittel, seinem Instrumente nicht nur in allen Lagen die grösste Tonfülle, sondern auch mannigfaltige Klangfarbennuancen abzugewinnen. Die Erforschung des hiebei stattfindenden Vorganges bleibt dem nächsten Vortrage vorbehalten.

---

26. Vortrag.

(Luftsäulen, Fortsetzung. — Stehende Schwingungen.)

Ich schloss meinen letzten Vortrag mit der, für unseren Gegenstand wichtigsten Frage: Wie geräth die Luftsäule in den Labialpfeifen in stehende, d. h. tönende Schwingungen? Dass hiezu ein, auf eine entgegenstehende Schneide treffender, bandförmiger Luftstrom erforderlich ist, wissen Sie bereits; denn, wenn wir den Versuch machen, durch die Röhre in axialer Richtung einen noch so kräftigen Luftstrom zu senden, so wird uns weder gelingen, den Resonanzton der Röhre, noch überhaupt einen Ton hervorzurufen.

Erforschen wir nun die akustische Wirkung des Luftbandes selbst. Bläst man gegen die Kante eines Kartenblattes oder gegen die Schneide eines Messers, so entsteht, wie die seinerzeit gemachten Versuche, vorzüglich aber der sogenannte »Vogelruf« uns lehrten, ein zischendes, brausendes Geräusch, das, wenn die Intensität des Luftstromes gesteigert wird, an Schärfe und Höhe zunimmt, und je nach der Stärke des Stromes mehrere Octaven ununterbrochener, ineinanderfliessender Töne durchlaufen kann, gleichsam ein, aus einer zahllosen Reihe unmessbar nahe liegender Töne gewobenes Tonband bildend.

Dass dieses Tonband am Labium einer Pfeife entsteht, lehrt uns ein Versuch, den wir mit einem solchen Labium, dem der Rohrfortsatz fehlt, jetzt vornehmen wollen (Fig. 175). Ich blase dasselbe isolirt an, und Sie vernehmen, je nach der Stärke des Blasens, das

Steigen und Fallen des Reibungstones. Es leuchtet nun ein, dass, wenn man diesen Reibungston derart regulirt, dass er mit dem Eigentone der Röhre im Einklange steht, der Eigenton zufolge des Resonanzgesetzes erregt wird, und ebenso klar ist es, dass, wenn der Reibungston bis zur Schwingungszahl eines Partialtones der Röhre gesteigert wird, auch dieser hervorgerufen werden wird.

Der, durch welches Mittel immer geweckte Resonanz- oder Eigenton der Röhre muss nothwendig als Beweis gelten, dass die Luftsäule der Röhre sich im Zustande stehender Schwingungen befindet, weil ohne diese bekanntlich ein Ton überhaupt nicht entstehen kann.

Wie nun bilden sich die stehenden Schwingungen, beziehungsweise die festen Punkte, welche die eintretenden Schallwellen zurückwerfen und so zu stehenden machen, und wo befinden sich diese Punkte?

Was die Bildung der, die stehenden Schwingungen abgrenzenden Knotenpunkte betrifft, die hier offenbar Flächen sein werden, so wird uns ein praktischer Versuch mit unserer zerlegbaren Röhre (Fig. 171) die Antwort auf diese Frage liefern.



Fig. 175.

Decken wir die halbe Röhre an einem Ende, so wird die, am offenen Ende eintretende Erregungswelle von dem verschlossenen offenbar zurückgeworfen werden. Der Verschluss bildet also eine Knotenfläche. Wir wissen von früher, dass die Schallwelle einer gedeckten Röhre doppelt so lang ist, als diese selbst; mithin ist die Rohrlänge gleich einer halben Welle, woraus folgt, dass am offenen Ende einer Röhre nur ein Bauch liegen kann.

Vereinigen wir unsere beiden Rohrtheile wieder zu einer offenen Röhre, die nun die doppelte Länge der soeben gedeckt gewesenen hat,

so bekommen wir, wie bekannt, denselben Ton, gleichviel bei welchem Ende wir die Röhre anblasen. Die Wellenlänge wird sonach dieselbe wie früher sein, und da am offenen Ende nur Bäuche liegen können, so wird sich die Knotenfläche nothwendig in der Mitte der Röhre befinden müssen.

Fassen wir das Resultat unserer schrittweise gewonnenen Erfahrungen und Schlüsse zusammen, so können wir folgende Sätze aussprechen:

»Bei offenen Röhren liegt im einfachsten Falle, nämlich wenn sie ihren Grundton geben, eine Knotenfläche in der Mitte; bei gedeckten Röhren bildet im gleichen Falle der Verschluss die Knotenfläche.«

Wiewohl der später folgenden systematischen Entwicklung vorgreifend, sei hier noch bemerkt, dass die Knotenflächen des nächsten Obertones bei offenen Röhren im ersten und vierten Viertheile der Rohrlänge, bei gedeckten im ersten Drittheile der Rohrlänge, dann, wie zuvor, am Verschlusse sich befinden. Dass das verschlossene Ende einer Röhre zur Knotenfläche wird, ja werden muss, erklärt sich so zu sagen von selbst. Einer eingehenden Betrachtung aber bedarf es, um eine zutreffende Vorstellung des Vorganges zu gewinnen, infolge dessen sich in der Mitte einer, in ihrem Grundtone erklingenden, beiderseits offenen Röhre eine Knotenfläche bildet. Hierbei wird uns die Sonreck'sche Theorie (von der sich übrigens schon bei Töpfer Anklänge finden), die wir bei der Erörterung der Entstehung des Schalles bereits kennen lernten, als Wegweiser dienen.

Halten wir uns das Bild einer, ihrer ganzen Länge nach transversal schwingenden Saite gegenwärtig. Wir wissen, dass sie an ihren beiden Befestigungspunkten fast gar keine Bewegung wahrnehmen lässt, dagegen in der Mitte, dem Schwingungsbauche, die grössten Excursionen vollführt, die oscillirenden Theile hier also die, ihrem längsten Wege entsprechende grösste Schnelligkeit ihrer Bewegung erlangen. Solche Stellen der Ruhe, wie die Befestigungspunkte, bilden auch die Knotenpunkte, wenn die Saite Partialschwingungen vollführt, ohne dass diese Punkte einer festen Abgrenzung bedürften. Denken wir uns jetzt die Zeichnung einer schwingenden Saite *a* (Fig. 176) in zwei gleiche Theile getheilt und diese Theile verkehrt aneinander gereiht *b*, so dass die beiden Befestigungspunkte in der

Mitte zusammenstossen und an den beiden Enden halbe Bäuche zu liegen kommen, und denken wir uns weiter, dass die Molecule, statt transversale Schwingungen zu vollführen, in der Längsrichtung und zwar gleichzeitig von den beiden Enden gegen die Mitte und dann wieder zurück schwingen, so ist einleuchtend, dass die Theilchen, welche von beiden Saiten mit gleicher Kraft in der Mitte zusammentreffen, hier die grösste Verdichtung erlangen, aber auch, weil die Kräfte

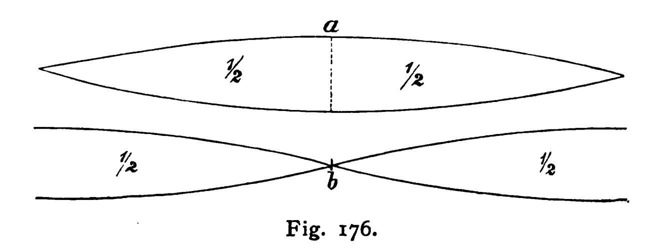


Fig. 176.

sich hier gleichen Widerstand leisten, nicht in derselben Richtung weiter fortschreiten können, sondern vermöge ihrer Elasticität wieder in ihre ursprüngliche Lage und selbst etwas darüber hinaus zurückschwingen müssen, was ihnen um so leichter gelingt, als sie durch ihre Bewegung gegen die Mitte zu einen leeren Raum hinter sich schufen, und vor sich in dem, ihrem eigenen gleichen Dichtigkeits-

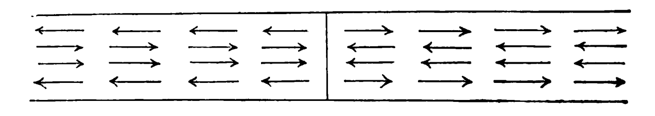


Fig. 177.

zustande der atmosphärischen Luft keinem Hindernisse begegnen. Wir werden also sagen können, dass die Knotenflächen einer schwingenden Luftsäule die Stellen der grössten Verdichtung und geringsten Bewegung, die Bäuche dagegen die Stellen der grössten Bewegung und geringsten Verdichtung sind.

Was die Bewegungsrichtung der schwingenden Lufttheilchen innerhalb der Röhre zu und von den Knotenflächen betrifft, so lässt sich an, mit Rauch gefüllten Glaspfeifen beobachten, dass die schwingenden Lufttheilchen, wenn sie den Weg vom Bauche zur

Knotenfläche hin nehmen, in der Mitte der Röhre, im entgegengesetzten Falle aber an deren Wand sich bewegen, wie solches die Pfeile in Fig. 177 andeuten.

Wie nun werden diese wechselnden Dichtigkeitszustände im Pfeifenrohre hervorgerufen und wie wird deren Periodicität durch den Anblasestrom eingeleitet und unterhalten?

Recapituliren wir in Kürze Sonnrek's Theorie.

Erhält der, aus der Kernspalte einer Pfeife hervorbrechende Luftstrom eine solche Richtung, dass er zum grössten Theile an der Aussenfläche des Oberlabiums vorüberstreicht und dessen Schneide nur insoweit trifft, um das, zur Weckung der Resonanz der, dem Tone entsprechenden Rohrlänge erforderliche Blasegeräusch zu erzeugen, so wird das Luftband vermöge seiner Strömungsbewegung die dem Mundloche zunächst liegenden Lufttheilchen in ungefähr gleicher Weise an sich reissen und fortführen, wie wir dies bei Blumenbestäubern, Inhalationsapparaten u. dgl. beobachten können, wo ein Wind- oder Dampfstrahl Flüssigkeiten ansaugt und staubförmig fortschleudert. Es entsteht dadurch eine Verdünnung, in welche die angrenzenden Theilchen, deren Gleichtgewichtslage gestört wurde, nachrücken, um ebenfalls vom Luftbande an sich- und fortgerissen zu werden. Dadurch schreitet die Verdünnung immer weiter gegen die Mitte der Röhre fort, bis der Moment eintritt, wo die äussere Luft das Uebergewicht erlangt und in den verdünnten Raum nachstürzt und zwar, wie nicht anders möglich, bei beiden Oeffnungen zugleich. Dieses beiderseitige, gleichzeitige, aber entgegengesetzte Eindringen führt nothwendig dazu, dass die beiden Luftschichten in der Mitte der Röhre aufeinander stossen, sich verdichten und momentan, gleichwie das im Punkte seiner grössten Elongation angelangte Pendel vor seinem Zurückschschwingen, eine allerdings unmessbare Weile stillstehen und dadurch die unbewegte Knotenfläche bilden, welche den, der Wellenlänge des Tones entsprechenden Resonanzraum in der Röhre abgrenzt. Die bei dem Mundloche eingedrungene Luftschichte hat aber zugleich das Luftband nach Innen gedrückt, welches dadurch in seiner Saugarbeit nicht nur unterbrochen wird, sondern jetzt auch dazu beiträgt, die Verdichtungswelle in dem Masse zu verstärken, in welchem sie zufolge des, im Vergleiche zum Querschnitte der Röhre am freien Ende kleineren Querschnittes

des Mundloches an Quantität und Bewegungsenergie der ihr entgegenkommenden Welle nachsteht. In diesem Momente hat sich aber auch schon der Ausgleich vollzogen. Die gegen die Mitte gedrängten Lufttheilchen schwingen zurück, der Druck der inneren Luft ist jenem der äusseren Luft gleich geworden, das Luftband kann wieder

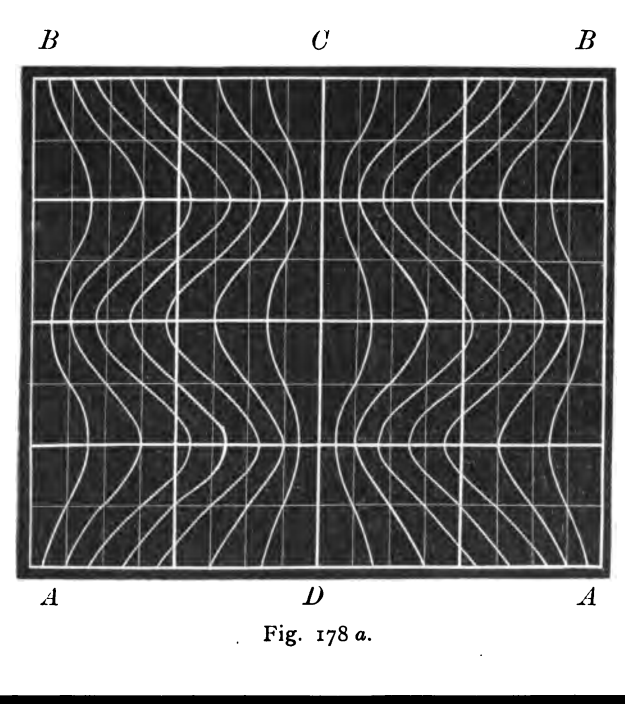


Fig. 178 *a*.



Fig. 178 *b*.

seine frühere Richtung einnehmen und seine Saugarbeit von neuem beginnen.

Es sollen für diese theoretischen Sätze nunmehr die experimentellen Beweise erbracht werden.

Zunächst soll Ihnen von den, im Innern der tönenden, beiderseits offenen Röhre stattfindenden Schwingungsvorgängen, und zwar von dem periodischen Wechsel der Verdichtungs- und Verdünnungs-

zustände dieses Bild eine schematische Vorstellung geben.[1]) Die Hälfte der Röhre hinweggedacht, bietet die Erscheinung das Bild der Schwingungszustände in einer einseitig gedeckten Röhre.

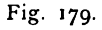


Fig. 179.

Wir werden nun durch Experimente die directen Beweise dafür erhalten:

1. dass die Knotenfläche im einfachsten Falle, wenn nämlich der Grundton in Betracht kommt, thatsächlich in der Mitte einer offenen oder am verschlossenen Ende einer gedeckten Röhre liegt;

2. dass die Knotenflächen die Stellen der geringsten Bewegung, und

3. dass diese Flächen wirkliche Verdichtungen, also Druckmaxima sind.

Den ersten Beweis wird uns eine Pfeife mit drei Flammenmanometern (Fig. 179) liefern. Gestalten wir die Pfeife zu einer offenen (wie die Zeichnung sie darstellt), so wird, sobald sie ertönt, die mittlere Flamme eine heftige Bewegung zeigen, ja unter Umständen verlöschen, weil hier die Knotenfläche besteht, mithin der stärkste Wechsel des Verdichtungs- und Verdünnungszustandes stattfindet. Sobald wir aber die Pfeife in die Octave überblasen machen, werden die beiden äusseren Flammen verlöschen, weil nun die Knotenpunkte dieses Tones hier liegen; die mittlere Flamme aber wird brennend bleiben, weil sie sich jetzt an der Stelle eines Schwingungsbauches befindet. Verschliessen wir die Röhre mit dem Deckel *a*, so wird die Bewegung der mittleren Flamme weit geringer sein, weil jetzt der Verschluss die Knotenfläche bildet, in der Mitte der Pfeife also bereits ein Theil des Bauches liegt, wo zwar grössere Bewegung, aber schon viel

---

[1]) Falls man über einen Projectionsapparat nicht verfügt, um mittels der auf Glas in mehrfachen Wiederholungen gezeichneten Figur (Fig. 178*a*), durch deren Vorbeiziehen an einer die offene Röhre darstellenden Lichtspalte die wechselnde Bewegungserscheinung zu versinnlichen, so kann man sich hiezu eines, mit einem schmalen Ausschnitte versehenen Cartons, wie Figur 178*b*, bedienen, den man über die Zeichnung in der Richtung *AB* und *BA* abwechselnd hin und her führt. — Im ersteren Falle können durch halbe Deckung der Lichtspalte bis zur Linie *CD* auch die wechselnden Dichtigkeitszustände der Luftsäule, wie sie in einer gedeckten Röhre stattfinden, versinnlicht werden.

mindere Dichtigkeit herrscht. Bei Hervorrufung des Obertones wird jedoch die untere Flamme verlöschen, da sie im Bereiche einer der Knotenflächen sich befindet.

Das Mittel, den Stillstand der Luftbewegung in den Knotenflächen sowie das Vorhandensein der Bewegung in den Bäuchen zu demonstriren, liefert eine gläserne Pfeife (Fig. 180), in die man eine

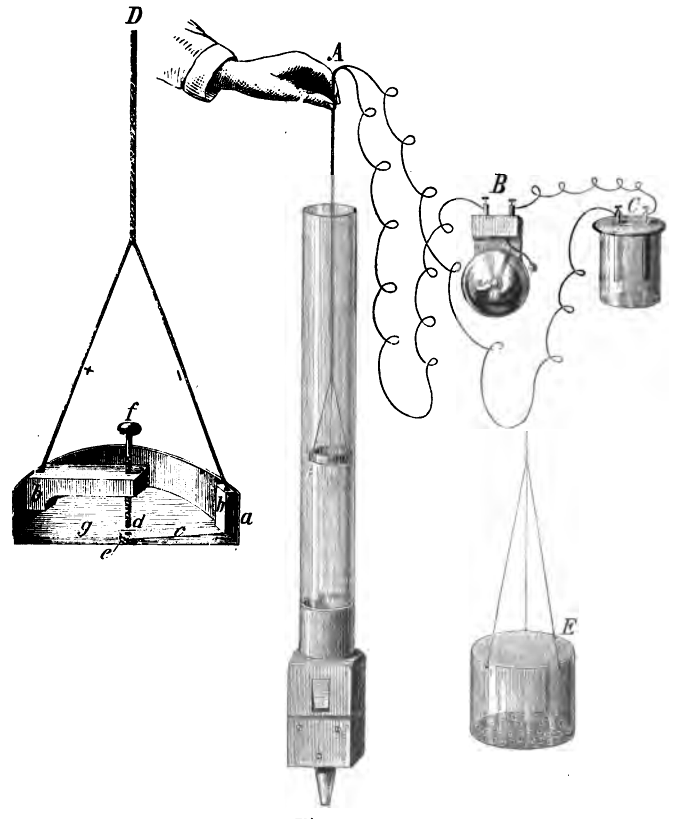


Fig. 180.

dünne, über einen Ring (*a*) gespannte Membrane *g* einführt (*A*) die durch ihr lautes Schwirren oder durch ihr Schweigen die Punkte der Bewegung und jene der Ruhe verräth. Ein an einem Stäbchen eingeführte kleine Zunge aus dünnem Papier leistet dieselben Dienste. Füllt man den Ring mit leichten Glasperlen (*E*), so wird das Geräusch in den Punkten der Bewegung sehr stark.

Versieht man die vorerwähnte Membrane mit einem Platincontact *ce* und mit Leitungsdrähten *bb D*, und verbindet diese mit einer elektrischen Klingel *B*, so erlangt man damit eine Vorrichtung, mittels welcher sich, je nachdem man das Experiment abändert, einmal die Lage der Knotenfläche und der Stillstand der Bewegung in ihr, dann aber auch der Schwingungszustand der tönenden Luftsäule überhaupt nachweisen lässt. Gibt man dem Contacte mittels der Stellschraube *fd* eine solche Stellung zur Membrane, dass der Stromschluss und mithin das Läuten der Klingel im Zustande der Ruhe erfolgt, so wird die Klingel verstummen, sobald die Pfeife ertönt und die Membrane sich in dem schwingenden Theile der Luftsäule befindet, weil die Oscillationen des Häutchens die dauernde Verbindung der Pole hindern. Diese erfolgt aber, wenn die Membrane in die Knotenfläche rückt, oder sobald man die Pfeife zum Schweigen bringt.

Wird die Stellung des Contactes geändert, nämlich von der Membrane ein wenig entfernt, so wird bei tönender Pfeife kein Stromschluss erfolgen, möge sich die Membrane an welcher Stelle immer befinden. Die Klingel wird jedoch sofort ertönen, wenn wir das Mundloch der Pfeife verschliessen, weil nunmehr nur ein ununterbrochener Windstrom die Röhre durchfliesst, der durch seinen einseitigen, rein mechanischen Druck die Membrane dem Contacte nähert. Wir schliessen auch hieraus, dass die Bewegung der Lufttheilchen in der tönenden Pfeife nicht in einer und derselben Richtung erfolgen kann, sondern nothwendig eine hin- und herschwingende (oscillatorische) sein muss, weil sonst auch beim Tönen der Pfeife die Klingel thätig sein müsste. Zugleich erkennen wir aus diesem Versuche neuerdings die Thatsache, dass ein axial durch eine Röhre gehender Luftstrahl nicht vermag, dieselbe zum Tönen zu bringen.

Wie bedeutend der mechanische Druck ist, welchen die Verdichtungswelle in der Knotenfläche erreicht, davon kann man sich durch ein Wassermanometer (Fig. 181) überzeugen. Dasselbe steht mit dem Innern der Pfeife durch ein, nach Aussen sich öffnendes Ventil (*a*) in Verbindung. An einer Knotenfläche, beispielsweise am Ende der, dadurch zur gedeckten gewordenen Pfeife angebracht (Fig. 182), wird jede Verdichtungswelle das Ventil öffnen und den Wasserspiegel in der Manometerröhre erhöhen. Bei Eintritt der Verdünnung schliesst sich das Ventil durch den Ueberdruck des Wassers,

dessen Spiegel folglich nicht sinken kann. Jede nächste Verdichtungswelle erhöht den Wasserstand, bis endlich Druck und Gegendruck gleich geworden, demzufolge im Wasserniveau eine weitere Veränderung nicht mehr platzgreifen kann. Das schliessliche Niveau zeigt die Grösse des Druckes an. Bei gewöhnlichem Orgelwinde (circa 100 Millimeter) beträgt dieser Druck, die entgegengesetzte gleiche Differenz der Verdünnung dazu gerechnet, — an 24 Millimeter oder $^1/_{430}$ Atmosphäre.[1]) An der Stelle eines Bauches angebracht, bleibt das Manometer fast unbewegt.

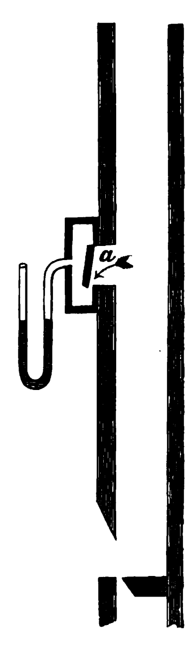


Fig. 181.

Eclatant ist der Effect, wenn wir das Manometer an der Mitte unserer Versuchspfeife anbringen (wodurch sie zur offenen wird), und sie so stark anblasen, dass sie in die Octave überschlägt. Die Wassersäule zeigt kaum eine Bewegung, während sie, wenn man durch schwächeres Blasen den Grundton erzeugt, sofort rapid steigt; abermals ein Beweis, dass der Oberton an dieser Stelle keine Knotenfläche hat. — Aus dieser verhältnissmässig bedeutenden mechanischen Kraft, welche die Schwingungen der Luftsäule entwickeln, erklären sich die Erschütterungen noch so starker Wände tönender Pfeifen.

Dass diese Erschütterungen von den Knotenflächen, den Stellen der grössten Verdichtung, ausgehen, lässt sich mit einer Pfeife

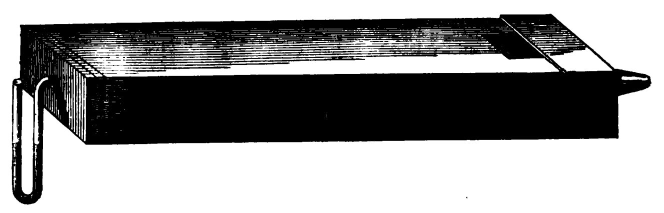


Fig. 182.

demonstriren, deren eine Wand aus Pergament besteht (Fig. 183), die also geringen Widerstand leistet. Aufgestreuter Sand wird sofort

[1]) 1 Atmosphäre = 10·336 Millimeter Wassersäule.

abgeworfen. Fasst man die Pfeife an diesen Stellen, so wird der Ton höher, ein Beweis, dass die Verdichtungen die Wand hinausdrücken und dadurch das Luftvolumen vergrössern. Befeuchtet man das



Fig. 183.

Pergament, so gibt es den Verdichtungsstössen noch mehr nach und der Ton wird dadurch tiefer. Grössere oder geringere Spannung des Pergamentes, zu deren Hervorbringung die an der Seitenwand ersichtliche Stellschraube dient, wirkt also erhöhend oder vertiefend auf den Ton der Pfeife.

---

27. Vortrag.

(Luftsäulen, Fortsetzung. — Obertöne. — Stimmvorrichtungen. — Reducirte Längen. — Lage der Knoten.)

Wir sind jetzt bei dem Punkte angelangt, wo wir, auf die durchschrittene Strecke zurückblickend, aus den über die Functionen der tönenden Luftsäule bisher gesammelten Erfahrungen eine Reihe von Folgerungen ziehen können.

1. Der Umstand, dass aus einer offenen Röhre zwei gleich lange (halbe) Schallwellen entsendet werden, während aus einer gedeckten nur eine solche Welle austreten kann, erklärt, warum eine offene Röhre unter sonst gleichen Verhältnissen noch einmal so stark tönt, als eine gedeckte von gleicher Tonhöhe.[1])

2. Je ungleich weiter die beiden Enden einer offenen Röhre sind, umsomehr verändern sich bei sonst gleichen Umständen Tonhöhe und Qualität des Klanges, und verringert sich die Schallkraft. Der Grund dieser Erscheinungen beruht in der nothwendigen Ver-

---

[1]) Wird an einem Principal a^1 und an einem Gedackt a^1 aus Zinn demonstrirt.

schiebung der Lage der Knotenfläche, wodurch ungleiche Wellenlängen entstehen, was eine gegenseitige Störung der Schallwellen zur Folge hat. — Wir überzeugen uns von all' diesem, wenn wir eine offene Pfeife allmälig decken.[1]) Der Ton wird zunehmend tiefer, schwächer, dumpfer in Folge des immer weiteren Hinaufrückens der Knotenfläche gegen jenes Ende, dessen Querschnitt wir durch das Decken mehr und mehr verkleinern. Vor dem gänzlichen Verschlusse verschwindet allmälig der Grundton in Folge der Interferenz der ungleichen Wellen, und man vernimmt statt seiner eine Reihe leiser, die kommende Wandlung gleichsam anmeldender, ungerader Obertöne, bis die Deckung eine vollständige geworden, worauf, nachdem jetzt der Knoten am geschlossenen Ende angelangt und dadurch eine Welle von doppelter Länge der Röhre entstanden ist, nunmehr der dieser Wellenlänge zukommende Ton auftritt. Eine im Verfolge dieser Erscheinung unternommene Reihe von Versuchen enthält die Beilage VI.

In Uebereinstimmung mit dieser Wellenlänge sollte der durch die Deckung entstandene Ton die tiefere Octave jenes der offenen Röhre sein. Dies ist jedoch nicht der Fall, sondern wir erhalten ein Intervall, welches je nach der Weite der Röhre sich mehr oder weniger der grossen Septime nähert.[2]) Es ist also offenbar die Welle zu kurz, und zwar deshalb, weil wir mit dem Decken nur die eine Dimension der, den gleichen Ton gebenden offenen Röhre, deren Länge nämlich, nicht aber auch deren Durchmesser geändert haben. Dieses aber müsste geschehen, um bei gleicher Länge die Octave zu erhalten, eingedenk der Erfahrung, dass gleichlange Röhren bei zunehmendem Querschnitte sich im Klange vertiefen.[3]) Es müsste also zugleich die Mensur weiter werden, d. h. der Querschnitt der Röhre in einem bestimmten Verhältnisse zunehmen, welches, wie der Begriff der Mensur überhaupt, bald ausführlicher erörtert werden wird.

---

[1]) Man kann sich zu diesem Versuche der Pfeife, Figur 179 aus dem vorigen Vortrage, bedienen — natürlich mit Hinweglassung der Gasbrenner.

[2]) Wird an mehreren Metall- und Holzpfeifen gleicher Tonhöhe, jedoch verschiedener Mensur demonstrirt.

[3]) Bei conischen oder pyramidenförmigen Pfeifen verengt sich beim Decken die Mensur, sie geben daher ein noch kleineres Intervall; umgekehrt conische oder pyramidenförmige dagegen ein grösseres als die Octave.

3. Dem Gesetze, dass tönende Körper, je weiter eine ihrer Dimensionen die beiden anderen hinter sich lässt, um so geeigneter zur Hervorbringung von Partialschwingungen werden, folgen auch die Luftsäulen.

Enge Röhren, je länger sie sind, geben um so schwerer den Grundton an, um so williger aber selbst bei mässigem Winde die Obertöne, gedeckte noch leichter als offene, während letztere nur durch eine bedeutende Steigerung des Winddruckes sich vom Grundtone abdrängen lassen.[1]) Auch die Fähigkeit, nebst dem Grundtone noch einen oder den anderen Partialton zugleich hören zu lassen, haben enge, zumal gedeckte Pfeifen mit langen Saiten und den durch Flammen ertönenden, engen Röhren gemein.[1]) Selbst auf Blasinstrumenten, vornehmlich auf der Flöte und dem Horne, sind Doppeltöne möglich. Der französische Hornvirtuose Vivier[2]) hat sie zu erzeugen gewusst.


Fig. 184.

4. Ein weiteres Mittel, Pfeifen, auch weit mensurirten, ohne Steigerung des Winddruckes Obertöne abzugewinnen, besteht in der Verringerung der Höhe des Aufschnittes, wodurch bewirkt wird, dass das Luftband kürzer, daher geeigneter wird, die, der Resonanz der höheren Töne entsprechenden, schnelleren Schwingungen zu vollbringen. Der höhere Resonanzton wird aber geweckt durch den höheren, weil vermöge des Umstandes intensiver gewordenen Reibungston, dass das Luftband in Folge seines kürzeren Weges zwischen Kernspalte und Oberlippe an letzterer auch mit grösserer Kraft brandet.[3])

5. Es leuchtet ein, dass die verschiedenen Erscheinungen, welche sich aus Aenderungen der Mensur, des Materials, der Form und Wandstärke der Pfeifenröhre, der Breite und Höhe, Form und Stellung des Mundloches, aus der Dicke, Richtung und Intensität

---

[1]) Wird demonstrirt, und zugleich das Experiment vorgenommen, den Grundton einer dem Ueberspringen in den nächsten Oberton nahe gebrachten Pfeife, sobald letzteres eintritt, durch Angaben des Grundtones mittels eines anderen Tonkörpers oder der Stimme, wieder herzustellen.

[2]) Vivier producirte die Doppeltöne zuerst 1843.

[3]) Wird an einer Holzpfeife mit verschiebbarem Oberlabium (Fig. 184) demonstrirt.

des Anblasestromes, endlich aus der Anwendung offener, theilweise oder ganz gedeckter Röhren ergeben, dem denkenden Orgelbauer zahllose Mittel darbieten, den Klang seiner Labialpfeifen zu charakterisiren, zu welcher Charakteristik die Stellung der Pfeifen im Werke selbst, dann Resonanzverhältnisse des Locales u. dgl. manchmal unabsichtlich oder gar gegen die Absicht beitragen können.

6. Dass das Luftband oder, wie wir es in diesem Falle richtiger nennen können, die Luftzunge aus- und einwärts schwingende Oscillationen vollführt, haben wir durch theoretische Folgerung erkannt. Wir können uns aber davon auch experimentell überzeugen, indem wir dem Mundloche einer Pfeife einen Federflaum oder eine kleine Papierzunge nähern.

Sie werden hiebei die Wahrnehmung machen, dass, wenn wir die Körperchen in die Nähe des Unterlabiums bringen, die Bewegung derselben nach innen gerichtet ist, während sie, an das Oberlabium gebracht, nach aussen getrieben werden. — Nach dem bisher Vorgetragenen bedarf diese, die Richtigkeit der Sonnrek'schen Theorie erweisende Erscheinung keiner weiteren Erklärung. Sie zeigt, wie die äussere Luft in Folge der Saugarbeit des Anblasestromes und der dadurch in der Röhre entstehenden Verdünnung das Uebergewicht erlangt und, die Luftzunge durchbrechend, gegen die Hinterwand eindringt, während die rückfliessende Verdichtungswelle, für welche kein Grund besteht, einen längeren Weg zu machen, sofort beim Oberlabium austritt.

Aber auch davon, dass unsere unsichtbare Luftzunge in jenem Tempo schwingt, welches der Wellenlänge des jeweiligen Tones entspricht, mithin erzwungene Schwingungen vollführt, können wir uns durch Versuche überzeugen.

Zunächst können wir den Anblasestrom, mithin den Reibungston, innerhalb erheblicher Grenzen steigern, bevor ein Uebergang von einem zum nächsten Theilton erfolgt.[1]) Die innerhalb jener Grenzen durch die Intensitätszunahme des Anblasestromes bewirkten Tonerhöhungen, welche man in der Sprache der Spieler von Blasinstrumenten das Treiben des Tones nennt, erstrecken sich selten über das Intervall eines Halbtones. Dieses »Treiben« bewirkt

[1]) Wird an offenen und gedeckten Pfeifen demonstrirt.

nur eine Restriction der Länge, nicht aber eine Vermehrung der schwingenden Abtheilungen der Luftsäule. Die Restriction der Wellenlänge aber beruht wahrscheinlich in einer, durch die gesteigerte Energie, mit der der Wechsel zwischen Verdichtung und Verdünnung sich vollzieht, bewirkten Beschleunigung der Oscillationen.

Wie diesen Schwingungsvariationen, fügt sich die Luftzunge auch jenen Veränderungen, welche die Schwingungszahl der Luftsäule durch Ab- oder Zunahme der Temperatur erfährt.

Der Einfluss, den die Wärme auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles übt, ist Ihnen bereits bekannt.

Durch Erwärmung der Röhre einer Pfeife wird deren Ton erhöht, die Zahl der Schwingungen, welche die Luftsäule vollführt, mithin vermehrt. Dass die Luftzunge mit dieser vermehrten Schwingungszahl in voller Uebereinstimmung vibrirt, schliessen wir nothwendig aus der gestiegenen Tonhöhe. Bringen wir aber die Luftsäule der Pfeife durch eine gleichgestimmte Stimmgabel oder Platte zum Tönen, so wird die Röhre, gleichviel ob die Luft in ihr mehr oder weniger erwärmt ist, den Gabel- oder Plattenton und nur diesen unverändert wiedergeben, weil die Resonanzschwingungen der Luftsäule auf die Schwingungen der schweren Massen dieser Tonkörper gar keinen rückwirkenden Einfluss zu äussern vermögen, sondern vielmehr diesen sich anbequemen müssen.

Bezüglich aller dieser Vorgänge genügt es, Ihnen die Experimente in Erinnerung zu bringen, die wir in diesen Richtungen bereits vorgenommen haben.

7. Nähern wir die Hand oder eine sonstige Fläche einer der Mündungen einer tönenden Röhre, so wird die Wirkung eine zunehmende Vertiefung des Tones sein. Diese Wirkung beginnt schon eine ziemliche Strecke vor der Röhrenmündung sich zu äussern, und es liegt der Punkt, wo diese Wirkung eintritt, um so weiter von der Mündung entfernt, je kleiner diese ist.

Diese Erscheinung, welche die verschiedenen Abweichungen der Pfeifenröhre von der Cylinder- und Prismenform behufs Charakterisirung des Tones veranlasst haben mochten, bietet einen wichtigen Behelf dar für die Intonation und die Regulirung der Stimmung von Orgelpfeifen mittels Verengung oder Erweiterung der offenen Enden mit dem sogenannten Stimmhorne *a* (Fig. 185) durch Ein- oder Aus-

biegen der Ränder (*b c*), Anbringung von sogenannten Stimmrollen (*d*), Schiebern (*e*), Ringen (*f*), Deckplatten (*g*), dann vor den Mundöffnungen durch Seiten- (*h*) und Winkelbärte (*i*).

Diese Erscheinung, auf welcher auch das sogenannte Stopfen der Horntöne beruht, wodurch ebenfalls Veränderungen der Klangfarbe wie der Tonhöhe bewirkt werden, liefert den Beweis, dass die Mündungen der Röhre nicht die Grenzen der schwingenden

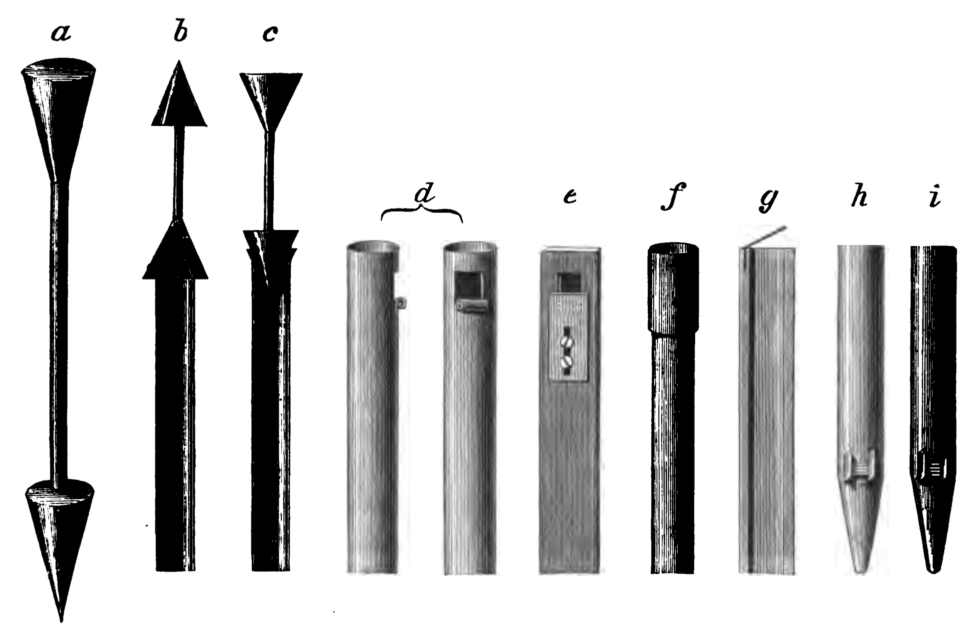


Fig. 185.

Luftsäule sind, sondern dass diese Grenzen ein Stück über die Enden der Röhre hinaus liegen.

Es leuchtet hiernach ein, dass das, von der Saite so streng befolgte Gesetz, wonach die Schwingungszahlen umgekehrt wie die Längen sich verhalten, auf die Luftsäule nur annähernd Anwendung finden kann, weil man nicht im Stande ist, ihr jene feste Abgrenzung zu geben, wie der zwischen zwei unverrückbaren Stegen schwingenden Saite.

Aber selbst dann, wenn die Länge der vibrirenden Luftsäule gleich wäre der Länge der Röhre, würde die Pfeife dem obigen Ge-

setze nicht genau zu entsprechen vermögen, da die Schwingungszahl ihrer Theile mit jener der ganzen Röhre in keinem genauen Verhältnisse stehen kann. Durch die Theilung der Röhre in zwei oder drei Theile würde man weder eine reine Octave noch eine reine Quinte erhalten; beide wären zu tief. Es liegt dies an dem ungeändert gebliebenen Querschnitte der Rohrtheile, demzufolge das Verhältniss ihrer Weite zu ihrer Länge ein anderes geworden ist, als dasjenige, welches zwischen der Weite und der Länge der ganzen Röhre bestand und wodurch das sogenannte Mensurverhältniss — worüber im nächsten Vortrage ausführlicher gesprochen werden wird — nothwendig alterirt werden musste.

Nachdem also — wie wir uns hievon alsbald überzeugen werden — die Vibration einer tönenden Luftsäule in jedem Falle über die Grenzen der sie umschliessenden Röhre hinausreicht, so wird die Röhre, wenn sie einen Ton von bestimmter Schwingungszahl geben soll, nicht die genaue Länge der aus der Schallgeschwindigkeit berechneten Länge haben dürfen, weil ja die Welle stets länger als die Röhre ist, die Schwingungszahl sonach kleiner und demgemäss der Ton tiefer sein würde. Um also das richtige Verhältniss der Pfeifenlänge zur Wellenlänge desjenigen Tones, den die Pfeife geben soll, herzustellen, muss erstere um jenes Stück verkürzt werden, um welches die schwingende Luftsäule über die Enden der Röhre hinausreicht. Die Länge einer, um ein solches Stück verkürzten Pfeife nennt man die reducirte Länge.

Bis auf welche Entfernung die äussere Luft an dem Schwingungszustande der tönenden Luftsäule betheiligt ist, um wieviel also die Röhre gegen ihre theoretische Länge verkürzt werden muss, damit die Wellenlänge das, der gewünschten Schwingungszahl entsprechende Maass erhalte, lässt sich nicht in einen für alle Fälle allgemein giltigen Ausdruck bringen, wohl aber in jedem einzelnen Falle sowohl durch Rechnung, wie auch experimentell bestimmen.

In erster Beziehung hat der berühmte Pariser Orgelbauer Cavaille-Coll eine ebenso einfache, als auch ziemlich genaue Formel aufgestellt. Nach derselben muss die Röhre einer offenen rechteckigen Pfeife um die doppelte Tiefe, jene einer cylindrischen um $^5/_3$ ihres Durchmessers (beides von der Linie der Luftspalte ab gemessen) kürzer sein, als die dem gewünschten Tone zukommende Länge der Schallwelle beträgt. Die Formel lautet demnach:

$$\text{Für } \square \text{ Pf. } L = \frac{G}{N} - 2\,T,$$

$$\text{» } \bigcirc \text{ » } L = \frac{G}{N} - {}^5/_3\,D,$$

wobei L die Länge der Röhre, G die Schallgeschwindigkeit (im Durchschnitte 340 Meter), N die Schwingungszahl, T die Tiefe und D den Durchmesser bedeutet.

Zur Erläuterung ein Beispiel. Es soll die Länge einer cylindrischen Pfeife bestimmt werden, deren Durchmesser 29 Millimeter beträgt, und die das Normal-$a^1 = 870$ Schwingungen geben soll. In diesem Falle wird $L = \frac{340}{870} - \left(29 \times \frac{5}{3}\right) = 39$ Cm. — 4·8 Cm., mithin die reducirte Länge 34·2 Centimeter betragen.

Von der Richtigkeit der Formel können wir uns sofort überzeugen, wenn wir den Versuch mit dieser, den genannten Diameter aufweisenden Pfeife durchführen und das hiebei gewonnene Resultat mit der Normalgabel vergleichen. [1])

Um die Länge der Strecke experimentell zu ermitteln, um welche die schwingende Luftsäule die Grenzen der Röhre überragt, gibt es verschiedene Methoden.

Wird nicht grosse Genauigkeit verlangt, so bedient man sich einer über dem offenen Röhrenende gehaltenen Membrane, welche, sobald sie in den Schwingungsbereich der Luftsäule gelangt, aufgestreuten Sand zum Hüpfen bringt (auch ein Federflaum, eine leichte Papierzunge kann zu solchem Versuche dienen), oder man nähert von zwei gleichgestimmten offenen Pfeifen dem Ende der einen allmälig eine Deckung, bis Schwebungen entstehen. Auch mittels der Contactmembrane (siehe Fig. 180) lässt sich die übergreifende Strecke constatiren. So lange sich die Membrane im Bereiche der Schwingung befindet, tönt die Klingel nicht.

Genauere Resultate erlangt man mittels einer, von R. König ersonnenen Methode, beziehungsweise mittels eines Apparates, den

[1]) Auf absolute Genauigkeit können obige Formeln aus dem Grunde keinen Anspruch machen, weil die Windstärke wie die Temperatur, für welche die Pfeife intonirt und eingestimmt werden soll, dann die Höhe des Aufschnittes Coëfficienten bilden, die das Resultat der Rechnung wesentlich alteriren können. Allein ihrem eigentlichen Zwecke, einer Pfeife die der geforderten Schwingungszahl entsprechende Länge zu geben, leisten diese Formeln Genüge.

Sie hier (Fig. 186) sehen, und welcher in einer offenen Pfeife besteht, deren Rückwand eine Längsspalte durchsetzt, die durch Wasser verschlossen wird. Diese Spalte dient dazu, um ein bis in die Mitte der Pfeife reichendes, gebogenes Röhrchen einführen und längs der Pfeife verschieben zu können, während dessen anderes Ende mittels eines Kautschukschlauches mit dem Ohre des Beobachters verbunden wird. An die Stelle des Ohres kann auch ein Flammenmanometer treten.

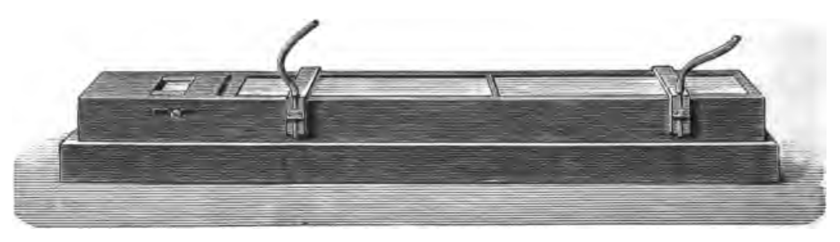


Fig. 186.

— Durch Verschiebung des Röhrchens lassen sich die Stellen der Knoten und Bäuche sehr genau bestimmen. Aus einem, mit dieser 1187 Millimeter langen Pfeife vorgenommenen Experimente, bei welchem der vierte Partialton[1]) untersucht wurde, ergaben die Abstände der Bäuche, welche infolge des plötzlichen Zurücktretens des Tones sich besser zur Bestimmung eignen als die Knoten, folgende Verhältnisse.

Vom	Mundloche	bis	zur	Mitte	des	1.	Bauches	226	Mm.
»	»	»	»	»	»	2.	»	558	»
»	»	»	»	»	»	3.	»	890	»
»	»	»	zum	oberen	Ende			1187	»

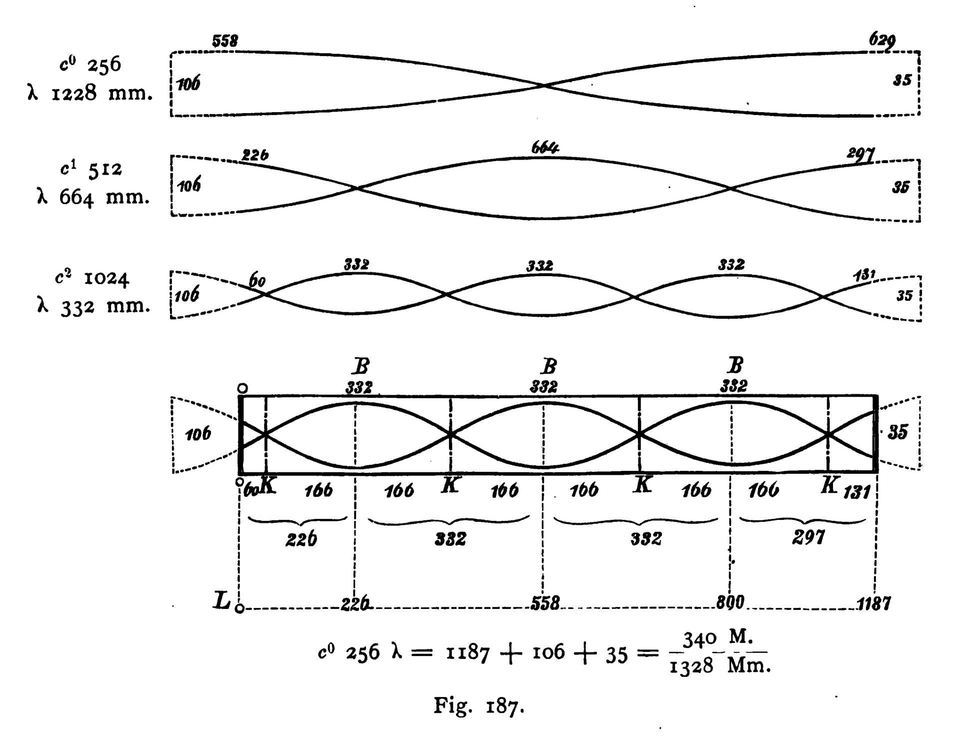
Die Längen dieser Strecken betragen sonach:

von	0	bis	226 =	226	Mm.
»	226	»	558 =	332	»
»	558	»	890 =	332	»
»	890	»	1187 =	297	»
				1187	Mm.

[1]) $c^3 = 1024$ V.

Hier die vollständige Darstellung (Fig. 187).

Es erhellt hieraus, dass die Abstände der Bäuche, wenn von den an den Enden liegenden abgesehen wird, constante Grössen bilden, während die an den Enden liegenden Abstände entsprechend dem Unterschiede der Weite der Oeffnungen am offenen Ende und am Mundloche die Wellen um 35, beziehungsweise 106 Millimeter zu kurz erscheinen lassen. Wir können sonach für unseren speciellen



c^0 256 $\lambda = 1187 + 106 + 35 = \frac{340 \text{ M.}}{1328 \text{ Mm.}}$

Fig. 187.

Fall nachweisen, dass die Welle am offenen Ende um $^1/_{35}$ und am Mundloche um $^1/_{11}$ die Röhrenlänge überragt.

Ein Versuch, den wir mit unserer Pfeife in Verbindung mit der manometrischen Flamme (siehe Fig. 148) vornehmen wollen, wird uns durch die Bewegung der Flamme, beziehungsweise aus dem in Zacken aufgelösten Spiegelbilde derselben den Knotenpunkt, dagegen durch ihren Stillstand, beziehungsweise aus dem Lichtbande die Mitte eines Bauches erkennen lassen.

28. Vortrag.

(Luftsäulen. Fortsetzung. — Pfeifen. — Mensur. — Flöte.)

Unsere, am Schlusse des vorigen Vortrages durchgeführten Versuche haben in einer jeden Zweifel ausschliessenden Weise dargethan, dass die Dichtigkeit in den Bäuchen tönender Luftsäulen jener der äusseren Luft gleich ist. Hieraus darf man den Schluss ziehen, dass die eingeleiteten Schwingungen auch dann unverändert fortbestehen werden, wenn wir an der Stelle eines Bauches in der Seitenwand eine Oeffnung anbringen, nachdem zum Austausche der in- und ausserhalb der Röhre befindlichen Luft in Folge ihrer gleichen Dichtigkeit der Anlass fehlt. Dagegen würde der Bestand der Schwingung sofort gestört werden, wenn wir diese Oeffnung an einer Knotenstelle anbrächten, denn in dem Momente, wo die Verdichtung hier eintreten wollte, würde ein Ausströmen dieser dichteren Rohrluft in die minder dichtere äussere Luft nothwendig erfolgen, dagegen im Momente der grössten Verdünnung die äussere Luft, deren Dichtigkeit in diesem Augenblicke grösser ist, das Uebergewicht über die Rohrluft an dieser Stelle erlangen und demzufolge bei der Oeffnung in die Röhre eintreten. — Der Versuch, den wir mit einer offenen Pfeife jetzt vornehmen wollen, die an den Knotenstellen ihres Grundtones, sowie des folgenden Obertones, also im ersten, zweiten und dritten Vierttheile mit verschliessbaren Löchern versehen ist (Fig. 188), wird uns die Richtigkeit unseres Raisonnements beweisen.

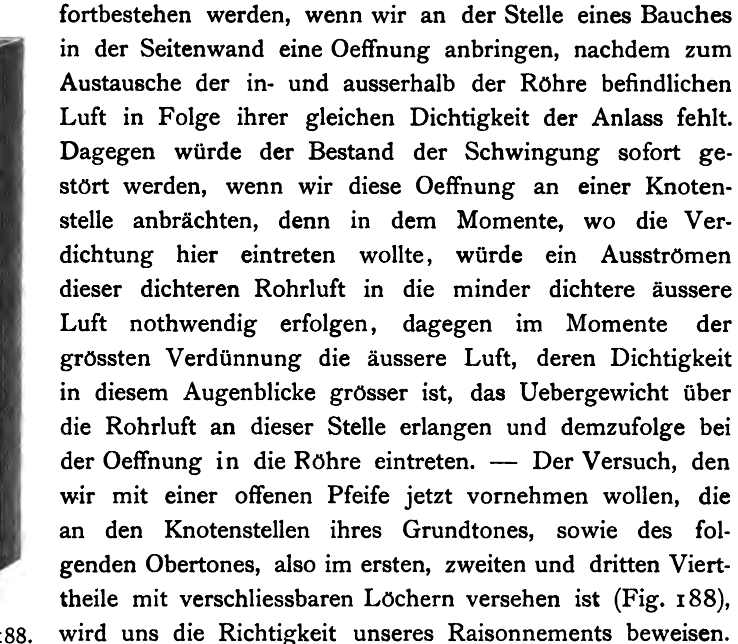


Fig. 188.

Lassen wir die Pfeife im Grundtone erklingen und öffnen wir den mittleren Verschluss, so springt der Grundton sofort in die Octave über, während derselbe bei Oeffnung des unteren oder oberen Verschlusses nicht alterirt wird. Ueberblasen wir die Pfeife in die Octave und öffnen den mittleren Verschluss, so entsteht keine Veränderung der Tonhöhe, ein Beweis, dass die Octave an dieser Stelle keine Knotenfläche hat. Oeffnen wir aber während der Ueberblasung den oberen oder unteren Verschluss, so kann die Octave nicht zustande kommen, da sie hier ihre Knotenflächen hat, wohl aber die Duodecime, deren Bäuche hier liegen. Der Bestand der

Duodecime wird dagegen durch das Oeffnen des mittleren Verschlusses vernichtet, da eine der drei Knotenflächen des dritten Partialtones in der Mitte der Rohrlänge sich befindet. Das folgende Schema (Fig. 189) klärt über alle diese Fälle auf. —

Die Stellen der Tonlöcher und Klappen der Blasinstrumente und deren Applicatur fussen auf diesem Verhalten der Luftsäule.

Es war bisher von Partialtönen der schwingenden Luftsäule wiederholt die Rede und wir haben uns von ihrem Vorkommen mehrfach zu überzeugen Gelegenheit gehabt. Wir wollen diesen Gegenstand nun näher ins Auge fassen.

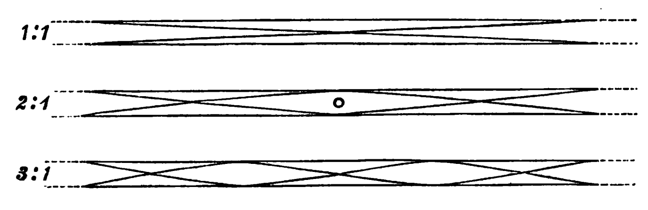


Fig. 189.

Theoretisch besteht kein Bedenken, die Zahl der Theilschwingungen-in welche eine Luftsäule sich zerlegen kann, als eine ebenso unbe, schränkte anzusehen, wie jene einer Saite, wenn nur beide die erforderliche Länge haben. Der Zuwachs an höheren Reihen wird selbstverständlich immer auf Kosten der niederen erfolgen.

In den Luftsäulen der Instrumente, die eine musikalisch-praktische Verwendung haben, reicht jedoch die Zahl dieser Zerlegungen nicht sehr weit: so in dem längsten Blasinstrumente, dem Naturhorne, dessen Röhre in der mittleren Tonlage zwischen 4 und $4^1/_2$ Meter misst, von der zweiten Hälfte der zweiten Octave höchstens bis zu den ersten Tönen der vierten Octave, während die Flöte ihren ganzen Tonumfang mit dreimaligem, und die Clarinette gar nur mit einmaligem Ueberblasen erreicht. Bei Orgelpfeifen kommt höchstens der zweite Theilton zur Verwendung.
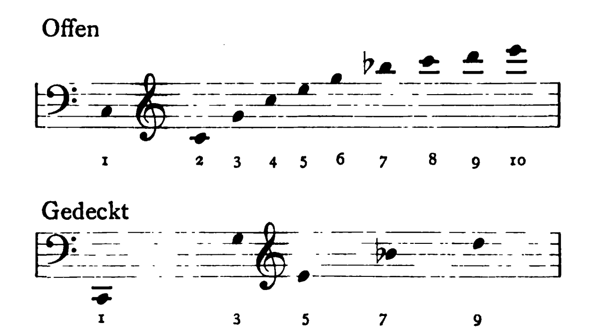
Die Partialschwingungen der Luftsäulen befolgen, gleichwie die der Saiten, das Gesetz der natürlichen Zahlenreihe, wobei nur der Unterschied zu berücksichtigen ist, dass die Saite bei Darstellung ihres Grundtones keinen Knoten hat, während bei offenen Pfeifen im gleichen Falle in der Mitte, bei gedeckten am verschlossenen Ende eine Knoten-

fläche sich befindet. Wir können also, dies beachtend, das für die Saiten geltende Schema auf die Schwingungen der Luftsäule genau anwenden, sobald wir dasselbe vom zweiten Theiltone ab benützen, beziehungsweise dessen Schwingungsart auf den Grundton der Luftsäule beziehen, wenn wir uns ferner erinnern, dass an den offenen Enden der Luftsäulen stets halbe Bäuche liegen, endlich wenn wir berücksichtigen, dass diese Bäuche ein Stück über die Rohrenden hinausragen, daher die Strecke vom Rohrende bis zur nächsten Knotenfläche kürzer ist, als die Hälfte der Strecke von Knotenfläche zu Knotenfläche im Innern der Röhre. Dies im Auge behaltend, wird Ihnen der Zusammenhang der in der Beilage VII enthaltenen Tabelle sofort einleuchten, und die Vorstellung jeder gewünschten Schwingungsart in offenen wie gedeckten Röhren keine Schwierigkeiten bereiten.

So erkennt man leicht:

1. dass in gedeckten Röhren nur ungeradezahlige Obertöne entstehen können, nämlich nur solche, bei welchen in offenen Röhren die Knotenfläche in die Mitte fällt, also der 1., 3., 5., 7. u. s. w. Partialton, während in offenen Röhren sowohl die geradezahligen, als die ungeradzahligen vorkommen, und

2. dass zwei gleich lange Röhren, deren eine offen, die andere gedeckt ist, keine zusammenfallenden Obertöne haben können, wie dies aus folgender Uebersicht ebenfalls leicht zu erkennen ist.



Wir gelangen nun zur Betrachtung der Tonwerkzeuge, in welchen die von uns erkannten Gesetze der tönenden Luftsäule praktische Anwendung finden.

Röhren, mittelst eines bandförmigen Luftstromes angeblasen, finden in der heutigen Musik nur als Orgelpfeifen mit stetiger,

und als Flöte mit wechselnder Tonhöhe Verwendung. Die Orgelpfeifen dieser, überhaupt Labial- oder Lippenpfeifen genannten Gattung zerfallen nach Beschaffenheit ihres oberen Endes in offene, halb- oder ganzgedeckte; ihrem Materiale nach in Metall- oder Holzpfeifen, und werden zu ersteren reines oder mit Blei in verschiedenen Verhältnissen versetztes Zinn (welche Mischungen »Metall« genannt werden), in neuerer Zeit auch Zink, zu den Holzpfeifen aber verschiedene Gattungen harten oder weichen Holzes verwendet. Der Form nach zerfallen die Pfeifen in cylindrische, aufrecht oder verkehrt conische, prismatische, aufrecht oder verkehrt pyramidenförmige; der Mensur nach in weite oder enge verschiedener Abstufung; endlich ihren relativen Tonverhältnissen nach in Grund- oder Füllstimmen. Ihrer, auf das jeweilige Fussmass der Wellenlänge des offenen *C* der Grundstimme, bezogenen Tonhöhe nach bilden Pfeifenreihen die verschiedenen »Stimmen« oder Register, die man als 32-, 16-, 8-, 4-, 2- und 1-füssige bezeichnet, und wonach die Orgel unter allen Instrumenten über den grössten Tonumfang, nämlich über mehr als neun Octaven gebietet, während die Füllstimmen je nach dem Verhältnisse, in welchem sie zum Grundtone stehen, als Quinten von $10^2/_3$, $5^1/_3$, $2^1/_3$, $1^1/_3$ Fuss und als Terzen von $6^2/_5$, $3^1/_5$, $1^3/_5$ Fuss bezeichnet werden. Hinsichtlich ihrer Tonfarbe endlich sind Pfeifen unzähliger Schattirungen zwischen vollem und magerem, dunklem und hellem, zwischen rundem, sanftem und streichendem, scharfem Klangcharakter fähig.

Zu den wichtigsten dieser Charakterisirungsmittel gehört in erster Reihe die Mensur. Dieses Wort wird in der Orgelbaukunst in zweifachem Sinne gebraucht.

Man versteht darunter sowohl das Verhältniss des Umfanges einer Pfeife zu ihrer Länge[1]), wie auch das Verhältniss, in welchem dieser Umfang in einer ganzen Pfeifenreihe zu- oder abnimmt.

Wir wollen jede dieser beiden Beziehungen etwas näher ins Auge fassen.

Jedem, der auch nur das Aeussere einer Orgel mit den, in den Prospectfeldern vertheilten grossen und kleinen Pfeifen gesehen hat, wird es ohneweiters klar sein, dass zur Hervorbringung der hohen

[1]) In diesem Sinne spricht man auch von einer Mensur der Blasinstrumente.

Töne nur die kurzen und engen Pfeifen bestimmt sein können, während die langen und weiten nothwendig zur Erzeugung tiefer Töne dienen.

Nun können aber sowohl kurze wie lange Pfeifen mehr oder weniger eng oder weit sein und dennoch dieselbe Tonhöhe haben, wie dies beispielsweise diese beiden Pfeifen, Principal und Aeoline, die in der Tonhöhe gleich sind, wiewohl die eine mehr als dreimal weiter im Umfange ist, als die andere. [1])

Allein durch ihre Klangfarbe unterscheiden sich diese zwei, ihrer Tonhöhe nach gleichen Pfeifen wesentlich; denn die enge hat einen schwachen, dünnen, die weite einen vollen, kräftigen Klang, wobei allerdings noch andere Factoren mitwirken können, von welchen alsbald ebenfalls die Rede sein wird.

Aus allen diesen Erwägungen und Erfahrungen folgt nun, dass es für Pfeifen, die derselben Tonhöhe entsprechen, verschiedene Maasse der Weite geben kann, welches Maass man die Mensur einer Pfeife nennt. Dieses Maass kann je nach dem gewünschten Klangcharakter des Pfeifentones ein überaus verschiedenes sein, da ja zwischen einer denkbar weitesten und einer denkbar engsten Mensur eine grosse Menge von Abstufungen möglich ist. Ein bestimmtes Maass für beide Grenzen gibt es nicht.

Zu den weitesten Mensuren dürfte jene zählen, nach welcher der Durchmesser in der Länge der Pfeife $9^1/_2$ mal enthalten ist; zu den engsten aber jene gehören, deren denselben Ton gebende Pfeife in ihrer Länge den Durchmesser 25 mal enthält. (Unsere zwei Musterpfeifen sind ein Principal a^1 von Ladegast in Weissenfels a. d. S. von 324 Millimeter Länge und 34 Millimeter Durchmesser und eine Aeoline desselben Tones von Rieger in Jägerndorf, 355 Millimeter lang, mit einem Durchmesser von 14 Millimetern.)

Betrachten wir jetzt die Bedeutung der Mensur, wenn sich diese auf das Verhältniss bezieht, in welchem Längen und Weiten in einer ganzen Pfeifenreihe zu einander stehen müssen.

Man nennt solche Pfeifenreihen Stimmen (uneigentlich »Register«), deren jede in der Regel aus so vielen Pfeifen besteht, als

---

[1]) Es sei hier bemerkt, dass alle, in diesem Vortrage citirten Pfeifengattungen gezeigt, angeblasen und erklärt werden.

die Claviatur der Orgel Tasten zählt. Von der Zahl solcher Stimmen hängt die Grösse einer Orgel ab.

Es ist leicht einzusehen, dass die in einer Orgel enthaltenen Stimmen nicht insgesammt von gleicher Art sein können, und ebenso unschwer erkennt man den Grund, weshalb es vielmehr das Bestreben der Orgelbauer aller Zeiten war und sein musste, den Charakter ihrer Stimmen möglichst mannigfaltig zu gestalten; vermochte ja doch einzig und allein die charakteristische Verschiedenheit der Klangfarben der einzelnen Tonreihen Ersatz zu bieten für die, dem starren, seelisch unbeweglichen Orgeltone mangelnde Ausdrucksfähigkeit.

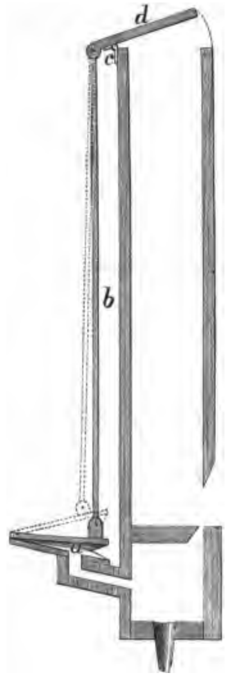


Fig. 190.

Dieser Mangel ist die nothwendige Consequenz der Entstehungsweise des Pfeifentones, der eine Steigerung oder Verminderung seiner Stärke nicht zulässt, weil jede Aenderung des Winddruckes eine Aenderung der Tonhöhe nach sich ziehen müsste, indem die Steigerung desselben die Erhöhung bis zum Ueberblasen, die Verminderung des Luftzuflusses aber die Vertiefung und endlich das Aufhören des Tones selbst zur Folge haben würde.

Es wurden mehrfach Versuche gemacht, den Ton von Labialpfeifen willkürlich an- und abschwellen zu machen, ohne die Tonhöhe zu alteriren. Einen dieser Versuche sehen Sie hier (Fig. 190). Das Bälgchen *a* communicirt mit dem Pfeifenfusse und wird durch den gesteigerten Winddruck mehr oder weniger gehoben. Da sich aber in demselben Verhältnisse die, durch die Verbindungsstange *b* um *c* bewegliche Deckplatte *d* senkt, so wird die, durch den verstärkten Wind gesteigerte Tonhöhe vermöge dieser Deckung im gleichen Maasse vertieft, demnach compensirt. Der jeweilige Windzufluss muss durch veränderlichen Tastenfall regulirt werden. Aus diesen Bedingungen ergibt sich das Complicirte solcher Versuche, abgesehen von den wechselnden Aenderungen der Klangfarbe, die eine nothwendige Folge des Deckens sind. Mit solchen Versuchen sind die sogenannten Echo- und Crescendowerke nicht

zu verwechseln, da diese immer nur auf alle gleichzeitig gespielten Töne wirken können.

Um nun aber »Stimmen« herzustellen, die sich durch den Charakter ihres Klanges von einander bestimmt abheben, muss jede Stimme diesen ihren Klangcharakter in allen Lagen erhalten.

Diese Bedingungen vermag in erster Reihe nur eine solche Mensur zu erfüllen, nach welcher die Querschnitte der Pfeifen in einem bestimmten regelmässigen Verhältnisse zu- oder abnehmen, je nachdem die Pfeifen zur Darstellung tieferer oder höherer Töne zu dienen haben.

Es wurde zuvor ausgeführt, dass für die Mensur einer Pfeife kein bestimmtes Mass besteht. Hat man jedoch dieses Mass einer Pfeife für die Herstellung einer bestimmten »Stimme« gewählt, so kann jenes der übrigen Pfeifen kein willkürliches mehr sein, sondern muss nunmehr einem bestimmten Gesetze folgen, das nur auf Kosten der grundsätzlich für den ganzen Umfang der Stimme, also durch alle Tonlagen anzustrebenden Gleichmässigkeit der Klangfarbe und Tonstärke verletzt werden könnte.

Es ist gewiss, dass die Verhältnisse, in welchen Weite und Länge der Pfeifen einer Stimme zu einander stehen, verschieden sein können, wie denn in der That in vielen, zumal älteren Orgeln verschiedene Mensuren vorkommen, von welchen manche auf ganz regellosen Verhältnissen beruhen; aber es ist nicht minder gewiss, dass von diesen Verhältnissen nur eines das richtige sein kann, nämlich dasjenige, welches der obigen Bedingung in jeder Hinsicht entspricht.

Eine solche Normalmensur verdankt man Gottfried Töpfer, der als Professor und Organist in Weimar thätig war, und sich um die Orgelbaukunst ebenso verdient gemacht hat, wie Chladny um die gesammte Akustik.

Diese Normalmensur bedingt, dass die Querschnitte der Pfeifen octavenweise zu- oder abnehmen wie $1 : \sqrt{8}$, d. h. wie $1 : 2{\cdot}8284$. Nach dieser Mensur fallen die halben Umfänge, Durchmesser oder Quadratsaiten auf die grosse Decime. Fielen sie auf die kleine Decime, so würde die Mensur gegen die Höhe zu enger. Fielen sie auf die Undecime, so würden die höheren Pfeifen nach und nach weiter. Im ersten Falle würde die Tiefe zum Nachtheile der Höhe begünstigt; im zweiten träte das Entgegengesetzte ein; in beiden

Fällen aber ginge die durchgängige Gleichheit der Klangfarbe und Stärke verloren. —

Diese Ausführungen über das Wesen der Mensur, dessen eingehendere Behandlung in die Lehre vom Orgelbau gehört, lassen genügend erkennen, dass die Mensuration in der That unter den Mitteln, dem Pfeifentone, beziehungsweise den Orgelstimmen einen bestimmten Klangcharakter zu verleihen, den ersten Rang einnimmt.

Zu den nicht minder wichtigen, dem gleichen Zwecke dienenden Behelfen zählen: der Aufschnitt und der Luftzufluss.

Unter Aufschnitt versteht man, wie schon angedeutet, den Abstand der Oeffnung zwischen der Kernspalte und dem Oberlabium, an welch' letzterem der aus der Spalte dringende Luftstrom brandet. — Je höher der Aufschnitt, um so dumpfer, je niederer, um so schärfer wird der Klang.

Unsere Pfeife mit verschiebbarem Oberlabium (man vergleiche Figur 184), liefert zum eben Bemerkten den Beweis, wenn man sie bei verschiedenen Stellungen des Oberlabiums in gleicher Stärke anbläst. —

Niederer Aufschnitt bewirkt den sogenannten »Strich« [1]) und begünstigt das Ueberblasen. Pfeifen, die den Grundton kräftig geben sollen, müssen hoch aufgeschnitten sein. Nicht minder hängt es aber auch von der Stärke des Anblasestromes ab, ob man einen vollen, kräftigen Klang oder das Gegentheil erlangen will: ob vorherrschend der Grundton zur Geltung gebracht, oder auch ein mehr oder weniger bestimmtes Hervortreten von Obertönen oder einzelner derselben bezweckt werden soll.

Fülle, Stärke und Grundtönigkeit des Klanges wird vorzugsweise durch offene Pfeifen, weite Mensur, hohen Aufschnitt und reichlichen Luftzufluss erzielt, während zarte Stimmen engere Mensuren, niederen Aufschnitt, geringere Windstärke erfordern, wobei auch theilweise oder ganz gedeckte Pfeifen in Anwendung kommen.

Von dem Zusammenwirken dieser drei Factoren: Mensur, Aufschnitt und Luftzufluss hängt die Charakteristik und zugleich die Schönheit der Orgelstimmen ab. Diese drei Factoren richtig

---

[1]) Davon rühren die, auf Klanganalogie beruhenden Bezeichnungen der bezüglichen Orgelregister her, wie: Geigenprincipal, Violine, Viola, (Viola di) Gamba, Violoncell, Violon u. s. w. (Nebenbei bemerkt, rühren die Namen Violine, Viola, Violoncello, Viola di gamba, Violon vom Veilchen (viola) her, indem diese Streichinstrumente zur Zeit ihrer Entstehung und noch lange nachher die Form dieses Blümchens hatten.)

anzuwenden, bildet die höchste, aber auch schwierigste Aufgabe der Orgelbauerkunst, die man das Intoniren nennt, denn dieses erfordert einen ausgebildeten Tonfarbensinn, Geschmack zur Beurtheilung der Klangschönheit, ein verlässliches, keinen Täuschungen unterworfenes Gehör, und nebst vieler Erfahrung auch sehr viel — Geduld. Nur ein mit solchen Eigenschaften begabter Künstler wird Stimmen vollendeter Art herstellen können. —

Betrachten wir nunmehr die einzelnen Pfeifenarten selbst, wobei wir uns natürlich darauf beschränken werden, die typischen Gattungen ins Auge zu fassen, ohne auf die vielfachen Varietäten derselben Rücksicht zu nehmen.

Zu den Orgelstimmen mit weit mensurirten offenen Labialpfeifen zählen zunächst die Principalstimmen. Sie bilden die Grundlage des Orgeltones und umfassen alle Octaven; ihr Mensurverhältniss beträgt 10 bis 14 Durchmesser; ihr Klang ist voll, hell, kräftig und vorwiegend grundtönig. Ihr Material ist gewöhnlich Zinn, in der Tiefe Holz, die Form cylindrisch, beziehungsweise rechteckig prismatisch.

Von gleicher Construction, jedoch enger mensurirt, sind die: Geigenprincipal, Gamba, Fugara, Salicional, Aeoline, Viola, Violoncell, Violon genannten Stimmen. Der Ton dieser Pfeifengattungen wird mit abnehmender Rohrweite schwächer und schärfer. Das Mensurverhältniss variirt zwischen 15 und 25 Durchmessern.

Aus conisch verengten Pfeifen weiter Mensur und daher dunkleren Klanges bestehen die Register Gemshorn und Spitzflöte.

Bei schwachem Luftzuflusse intonirte Pfeifen von, je nach dem Materiale, cylindrischer oder conischer, prismatischer oder pyramidenartiger Form bilden die verschiedenen, den Flötenton nachahmenden und daher uneigentlich Flöten genannten Pfeifenarten, von welchen einige in der höheren Lage die doppelte Länge erhalten und in die Octave überblasen. Sie werden aus Holz oder Metall hergestellt, erhalten entweder gewöhnliche einfache oder doppelte Labien, oder ein sogenanntes Froschlabium, mit welchem sie in der Art der Querflöten angeblasen werden. Figur 191 zeigt eine mit Froschlabium versehene Pfeife von Aussen (*a*) und im Durchschnitte (*b*).

Gedeckte Pfeifen haben durchwegs einen dunkleren und schwächeren Klang, zumal wenn sie weit mensurirt und hoch aufgeschnitten sind.

Man nennt die aus solchen Pfeifen bestehenden Register in den tieferen Lagen Untersatz, Subbass, Bourdon; in den höheren: Gedackt, mit verschiedenen Beisätzen, wie: lieblich gedackt, still gedackt, u. s. w.

Eine Eigenthümlichkeit der, Quintaten genannten Stimmen ist das gleichzeitige Mittönen der Duodecime mit dem Grundtone. Die Pfeifen der sogenannten Rohrflöte gehören zu den halbgedeckten, und leiten ihre Bezeichnung von dem offenen Röhrchen her, das in dem Deckel des »Hutes« eingesetzt ist, und wodurch auch hier eine theilweise Communication mit der Aussenluft hergestellt wird.

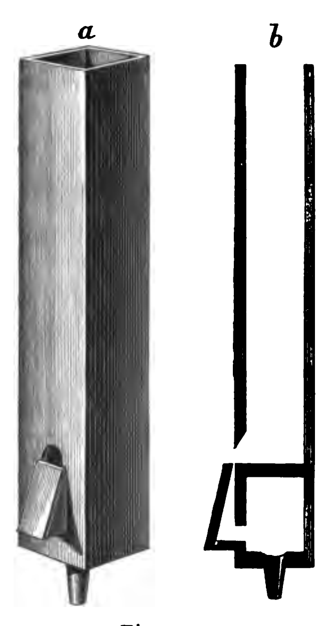


Fig. 191.

Der eigenthümlich helle Klang dieser Pfeife rührt von dem fünften Partialtone (der Terz) her, dessen stärkeres Hervortreten die Wirkung des Röhrchens ist. Der Klang unserer a^1-stimmenden Rohrflöte wird demnach von dem cis^3 begleitet sein, das Sie mit Hilfe eines gleichgestimmten Resonators und hierauf auch ohne diesen deutlich vernehmen werden.

Die Neben- und Füllstimmen bestehen entweder aus einzelnen Pfeifenreihen, die der Quinte oder Terz als Obertöne der verschiedenen grundtönigen Stimmen, einzeln oder verbunden, entsprechen, oder aus mehreren solchen Reihen, wie beispielsweise die »Cymbel« genannte Mischstimme, welche aus Octaven, die Mixturen, die aus Octaven und Quinten, und die Cornette, die aus dem vollständigen Dur-Dreiklang in verschiedenen Lagen zusammengesetzt sind. In der Beilage VIII finden sich Mischstimmen (in den gebräuchlichsten Zusammensetzungen), sowie Füllstimmen in Noten dargestellt.

Alle diese Stimmen haben grösstentheils weite Mensuren und unterscheiden sich von anderen Pfeifen nur durch ihre Stimmung.

Was nun die richtige Wahl der Mensuren, die Zusammensetzung der Pfeifenreihen nach Klangcharakter und Tonhöhe und das

Verhältniss der Grund- zu den Füllstimmen, wie es der jeweiligen Grösse der Orgel entspricht, sowie die vielfachen sonstigen Gesichtspunkte betrifft, die bei der Anfertigung, Ausarbeitung und Intonirung der Pfeifen ins Auge zu fassen sind, so kann auf diese, schon in die Technik des Orgelbaues übergreifende Details hier nicht weiter eingegangen werden, und muss ich diesfalls auf die einschlägige reichhaltige Literatur, insbesondere auf Töpfer verweisen. —

Von Blasinstrumenten ist nur das bekannte Orchester- und Soloinstrument, die Flöte (Quer- oder Traversflöte), zufolge ihrer Tonbildung, die auf dem Principe der Brandung eines Luftbandes an einer gegenüber stehenden Kante beruht, zur Familie der Labialpfeifen zu zählen.

Die Röhre, deren reducirte Länge der Wellenlänge des kleinen a^0, d. i. des auf vollkommenen Flöten erreichbaren tiefsten Tones, entspricht[1]), wird an einer in der Nähe des oberen verschlossenen Endes angebrachten Oeffnung mit dem Munde angeblasen.

Die Leichtigkeit und Schönheit der Tonbildung hängt von der Richtung, Quantität und Stärke des Anblasestromes, zugleich auch von der Stellung der Lippen, besonders der Oberlippe ab. Letzterer fällt die ausserdem wichtige Aufgabe zu, die Tonhöhe zu regeln, indem sie sich mehr oder weniger über die Anblaseöffnung legt, um dadurch das Steigen des Tones bei stärkerem Blasen zu verhindern da bekanntlich Labialpfeifen mit zunehmendem Luftdrucke höher werden, demzufolge auch auf der Orgel ein An- und Abschwellen des Tones durch Intensitätsänderungen im Anblasestrom ausgeschlossen ist. Die, den verschiedenen Tönen entsprechenden Wellenlängen werden durch, in der Röhre auf bestimmten Entfernungen angebrachte Oeffnungen — die sogenannten Tonlöcher — abgegrenzt, die theils unmittelbar mit dem Fingerwulste, theils durch Klappen verschlossen werden. Jedes Freiwerden einer solchen Oeffnung hat aus früher bemerktem Grunde die Wirkung, als wäre die Röhre an dieser Stelle abgeschnitten und es reicht also die Wellenlänge des betreffenden Tones stets nur bis zu der, der Anblaseöffnung zunächst befindlichen, unverschlossenen Oeffnung, welche Oeffnungen selbstverständlich nach den reducirten Rohrlängen berechnet sind. Die Töne

[1]) Flöten, die nur bis h^0 oder b^0 in die Tiefe reichen, haben eine dementsprechend kürzere Röhre.

reichen chromatisch vom kleinen *a*, beziehungsweise von *b* oder *h* bis zum viergestrichenen *c*, die Grundtöne nur bis zum zweigestrichenen *cis*. Die Töne der zweiten und dritten Octave werden dadurch erzeugt, dass man die Grundtöne in die Octave, Duodecime und zweite Octave überbläst.

Die Grundstimmung der Flöte wie des um eine Octave höheren Piccolo ist *D*-dur, unbeschadet der Zahl der unter das d^1 reichenden Töne. In der Militärmusik kommen jedoch auch *Es*-Flöten vor. Der zwischen der Anblaseöffnung und dem ersten Tonloche befindliche sogenannte Stimmzug dient dazu, um die Tonhöhe des Instrumentes beim Zusammenspiele mit jener eines anderen in Einklang zu bringen. Sein Gebrauch muss nothwendig die innere Reinheit der Stimmung des Instrumentes beeinträchtigen, weil dadurch die geregelten Verhältnisse zwischen den Tonlöchern (die ja ihre gegenseitigen Entfernungen beibehalten) und dem Grundtone alterirt werden.

Der die obere Rohröffnung verschliessende Pfropf hat die Aufgabe, Unzukömmlichkeiten auszugleichen, die sich aus der, in der Richtung gegen die Endöffnung conisch verlaufenden Bohrung der sogenannten Wiener Flöte in Bezug auf die Reinheit der höheren Intervalle ergeben. Ganz vermieden werden dieselben aber nur in der nach ihrem Erfinder benannten Böhm-Flöte, die vermöge ihrer durchaus cylindrischen Bohrung, grösseren Tonlöcher, und deren genau berechneten Abstände die volle Reinheit aller Tonverhältnisse, sowie grösseren und gleichmässigeren Ton vor der alten Flöte voraus hat.

---

29. Vortrag.

(Zungen.)

Die gleichwichtige zweite Gruppe der zahlreichen Familie von Tonwerkzeugen, welche der tönenden Luftsäule ihr Dasein verdanken, bilden die sogenannten Zungeninstrumente. Ausser der Luftsäule hat diese Gruppe mit jener der Labialpfeifen zwar auch das gemein, dass bei beiden eine Zunge es ist, die die Schwingungen der Luftsäule einleitet und unterhält. Allein die Zunge, die bei Labialpfeifen

aus Luft besteht, ist hier aus weit derberen Materialien, wie Metall, Holz und membranösen Gebilden geformt. Daraus ergibt sich nun eine Reihe wesentlicher Unterschiede zwischen unseren beiden Instrumentalgruppen. Betrachten wir zunächst die Construction einer Zunge, mit welchem Worte wir fortan die aus festem Stoffe gebildete zum Unterschiede von der Luftzunge bezeichnen wollen.

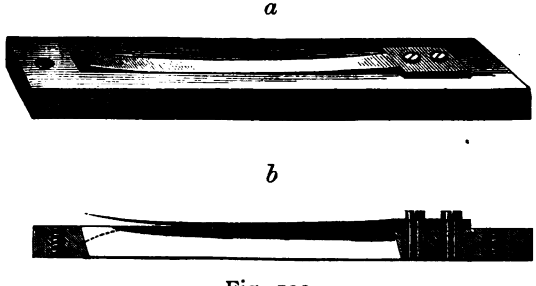


Fig. 192.

Die Zunge, wenn sie aus einem, durch innere Steifigkeit elastischen Körper, wie Metall oder Holz besteht, bildet einen länglichen Streifen, der, an einem Ende befestigt, mit dem anderen Schwingungen vollführt. Wenn die Schwingungen der Zunge zwischen einem, in einer Platte angebrachten Ausschnitte erfolgen, welchen die Zunge

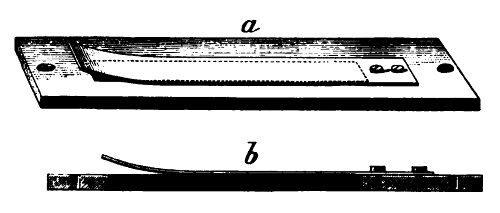


Fig. 193.

bei jedem Durchgange möglichst vollkommen abschliesst, ohne an den Saiten zu streifen, so nennt man derart eingerichtete Zungen »durchschwingende« oder »durchschlagende«; (Fig. 192 zeigt dieselben von oben (*a*) und im Durchschnitte (*b*) gesehen), während Zungen, die breiter und länger sind, als der Ausschnitt, und demzufolge auf diesen bei jeder Schwingung aufschlagen und ihn so verschliessen, »aufschlagende« genannt werden (Fig. 193 *a b*). — In den Zungenpfeifen der Orgeln finden beide Arten Anwendung; im Harmonium,

in der Physharmonika, Concertina, Zieh- und Mundharmonika, in den Stimmpfeifchen und Accordeons, wie in Sonometern nur durchschlagende; in der Sackpfeife (Dudelsack), dann in den als Kinderspielzeug dienenden Trompetchen u. s. w. aufschlagende, deren primitivste Form ein seitlich oder axial geschlitzter Gänsekiel (*a*) oder Strohhalm (*b*) in Figur 194 darstellt. Alle diese Zungen werden in der Regel aus hartem Messing erzeugt.

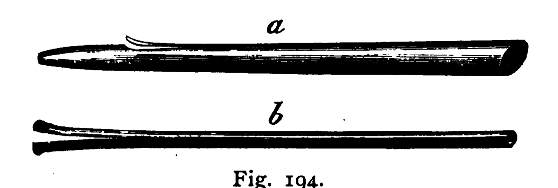


Fig. 194.

Zungen aus Holz, beziehungsweise aus dem sogenannten italienischen Rohre kommen nur bei Blasinstrumenten, wie Clarinette, Oboë, Fagott und ihren Unterarten, in Anwendung.

Der fundamentale Unterschied zwischen durch- und aufschlagenden Zungen hinsichtlich des Schwingungsvorganges und der daraus folgenden phonischen Ergebnisse beruht darin, dass die ersteren nach zwei Richtungen frei zu schwingen vermögen und hierbei in jeder dieser Richtungen nur auf Luft stossen, während die anderen in einer Richtung gegen einen festen Gegenstand anprallen, wobei es im Grunde gleichgiltig ist, ob letzterer unbeweglich ist, wie die Kelle einer aufschlagenden Zungenpfeife, der Clarinettschnabel, der unbewegte Theil des Gänsekieles . . , oder, ob er ebenfalls eine schwingende Zunge bildet, wie solches bei den, zum Anblasen von Oboë und Fagott dienenden, »Röhrchen« genannten Mundstücken der Fall ist, die aus zwei beim Tönen gleichzeitig abwechselnd gegen- und voneinander schwingenden Blättchen bestehen, oder endlich, ob es sich um in gleicher Weise vibrirende Membranen handelt, seien es die menschlichen Lippen, mittels welcher eine besondere Gruppe von Blasinstrumenten, wie Trompete, Horn, Posaune und ihre Unterarten, zum Tönen gebracht wird, oder die Stimmbänder des Kehlkopfes oder künstliche Nachbildungen derselben.

Wie fungiren nun diese verchiedenen Arten von Zungen als Tonerreger? Genau betrachtet so, wie die Luftzunge; denn, wie diese,

haben sie die Aufgabe, durch intermittirende Stösse Verdichtungs- und Verdünnungswellen zu veranlassen; denn, ob die zur Erzeugung von Stössen erforderlichen periodischen Unterbrechungen eines Luftstromes, beziehungsweise das abwechselnde Schliessen und Oeffnen seiner Passage durch gegenseitiges Annähern und Entfernen der Lippen, der Stimmbänder, oder der Doppelblättchen des Oboë- oder Fagottröhrchens, oder ob die Unterbrechungen durch Aufschlagen und Zurückschwingen, oder durch Abschluss des Luftweges bei jedesmaligem Durchschwingen bewirkt werden, — die Wirkung bleibt im Grunde dieselbe.

Gleichwohl finden zwischen der Luftzunge und Zungen aus festen Stoffen wesentliche Unterschiede statt. Einer derselben beruht darin, dass die Zungen Klangerreger sind, die mehr oder weniger ihren bestimmten Eigenton haben, während die Luftzunge nur Reibungsgeräusche hervorzubringen vermag, dass mithin, um tönende Impulse hervorzurufen, die Luftzunge des Resonanzrohres bedarf, während Zungen von materieller Beschaffenheit durch solche Röhren nur eine klangliche Ausbildung und Verstärkung ihres eigenen Tones erfahren, aber unter Umständen dieses Mittel auch ganz entbehren können, wie bei der Physharmonika, dem Harmonium, der Zieh- und Mundharmonika u. s. w.

Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass die Luftzunge nur die Resonanz-, beziehungsweise Aliquottöne der Luftsäule der Röhre hervorrufen kann, und in ihren Schwingungen von dem Tempo des jeweiligen Rohrtones abhängig ist, während die, vermöge ihrer Materie mehr oder weniger starre und unnachgiebige Metall- und Holzzunge durch Resonanzröhren innerhalb gewisser Grenzen in ihren Eigenschwingungen wenig und nur im hemmenden Sinne beeinflusst werden kann. Die Schwingungen der Lippen accommodiren sich jener des Rohrtones.

Scheiden wir die Zungeninstrumente in zwei Hauptgruppen: nämlich eine solche, wo jede Zunge zur Hervorbringung stets nur eines und desselben Tones bestimmt ist, und in solche, wo zur Hervorbringung aller, dem Umfange des Instrumentes entsprechenden Töne eine und dieselbe Zunge zu dienen hat, wie solches bei den Blasinstrumenten der Fall ist, so werden wir sie am zweckmässigsten in der Reihenfolge betrachten, dass wir mit jenen Gattungen beginnen,

deren Zungen in ihren tönenden Schwingungen im geringsten Masse von Nebenumständen abhängig sind, die also in Folge der ihnen eigenen Elasticität auch ohne Hinzutritt eines, ihre Schwingungen anregenden und erhaltenden Luftraumes tönen, und mithin, wenn eine solche Erregungsart allein in Betracht kommt, nothwendigerweise durchschwingende sein müssen, da jedes Hemmniss die Eigenschwingung sofort vernichten würde, — wie man sich durch den Versuch mit einer aufschlagenden Zunge leicht überzeugen kann, wenn man dieselbe mit dem Fingernagel oder einem Messer emporhebt und in dieser Lage loslässt.

Diese sogenannte freie, mit einem Resonanzkörper nicht versehene Zunge findet in einer Reihe von Instrumenten Anwendung, deren vorzüglichster Vertreter das, in seiner vollendeten Form künstlerischen Zwecken vollkommen entsprechende Harmonium ist, woran sich die ältere Physharmonika, die Concertina, die Zieh- und die Mundharmonika u. s. w. reihen.

Die Kunst der Fabrikation hat die freie Metallzunge zu grosser Vollkommenheit gebracht, indem sie ihrem Tone ziemliche Kraft abzugewinnen und mannigfaltiges Kolorit zu verleihen weiss und zwar vorzugsweise, um nicht zu sagen fast ausschliesslich, durch die Verschiedenartigkeit der Mensuren, d. i. durch Abänderung der Verhältnisse von Länge, Breite und Dicke der Zungen, dann auch durch deren Stellung (liegend oder aufrecht) zur Richtung des Anblasestromes.

Die ausserordentliche, beinahe dem Claviere gleichkommende Verbreitung, welche das Harmonium besonders in Frankreich, England und Amerika gefunden, beruht auf zwei Vorzügen der freien Metallzunge, deren erster darin besteht, dass sie ein sehr weit gehendes An- und Abschwellen des Tones gestattet, ohne in ihrer Schwingungszahl wesentlich alterirt zu werden. Während also die Zunge für die geringsten Variationen des Winddruckes hinsichtlich der Tonstärke äusserst empfindlich ist, bewährt sie bei nicht zu grossen Unterschieden des Winddruckes in Bezug auf die Tonhöhe einen bedeutenden Grad von Unempfindlichkeit. Nur bei übermässigem Winddrucke gibt sich ein Sinken des Tones kund.

Der andere, ebenso wesentliche Vorzug der freien Zunge beruht in ihrer nicht minder grossen Unempfindlichkeit gegen thermische Einflüsse, was sich durch ihre geringe Masse und Länge erklärt, welch' letztere sich zur Länge einer gleichtönenden offenen Luftsäule

wie 1 : 20 bis 1 : 40 verhält. Diesem Umstande verdanken die betreffenden Instrumente die so werthvolle Eigenschaft ihrer nahezu absoluten Unverstimmbarkeit.

Diese doppelte Unempfindlichkeit gegen Variationen der Windstärke und der Wärme in Bezug auf die Schwingungszahl machen die freie Zunge auch zu sonometrischen Zwecken in hohem Grade geeignet, wovon später noch ausführlicher die Rede sein wird.

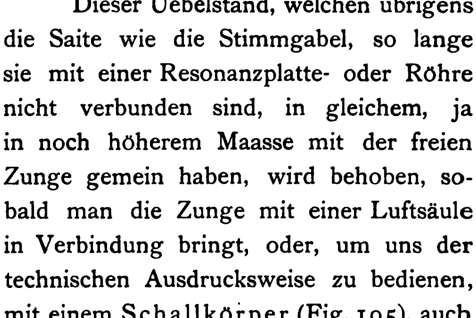


Fig. 195.

Leider hat die freie Zunge auch ihre Schattenseite, die sich in der geringen Schallkraft und Tragweite ihres Klanges zeigt und darin ihren Grund hat, dass die Zunge vermöge ihrer verhältnissmässig sehr kleinen Oberfläche dem entsprechend auch nur eine sehr kleine Luftschichte in Bewegung setzen kann.

Dieser Uebelstand, welchen übrigens die Saite wie die Stimmgabel, so lange sie mit einer Resonanzplatte- oder Röhre nicht verbunden sind, in gleichem, ja in noch höherem Maasse mit der freien Zunge gemein haben, wird behoben, sobald man die Zunge mit einer Luftsäule in Verbindung bringt, oder, um uns der technischen Ausdrucksweise zu bedienen, mit einem Schallkörper (Fig. 195), auch Schallbecher, Ansatzrohr oder »Aufsatz« genannt, (gleichviel ob verkehrt kegelförmig (*a*) [aus Metall] oder verkehrt pyramidenförmig (*b*) [aus Holz]) versieht. Damit nun haben sich aber, indem aus der freien Zunge eine Orgelpfeife[1]) geworden, ihre Verhältnisse wesentlich geändert.

Die Zunge tritt nämlich in Folge der Einwirkungen des Schallkörpers, beziehungsweise der von ihm umschlossenen Luftsäule, in eine Abhängigkeit zu Gesetzen, die für die Schwingungen der Luftsäule maassgebend sind, und sie wird dadurch in beiden Eigenschaften

[1]) Die gebräuchlichsten Zungenstimmen sind, und zwar durchschwingende: Oboë, Clarinett; aufschlagende: Clarine, Trompete, Posaune.

beeinträchtigt, die die freie Zunge auszeichnen. Denn in der Verbindung mit einer Luftsäule erleidet sie:

1. bei Aenderung des Winddruckes nicht nur Aenderungen ihrer Tonstärke, sondern zugleich auch ihrer Tonhöhe und ebenso wird sie

2. durch die Aenderungen, welche die Tonhöhe der Luftsäule in Folge thermischer Einflüsse erleidet, in Mitleidenschaft gezogen und dadurch auch in ihrem Vorzuge der Unverstimmbarkeit beeinträchtigt.

Diese Einwirkungen sind indessen nur insofern relativ beträchtliche, als es sich um den Vergleich freier und mit Ansatzrohr verbundener Zungen handelt; denn an und für sich wird die Stimmung der Zungenpfeifen durch die genannten Einflüsse in weitaus geringerem Maasse afficirt, als jene der Labialpfeifen, was sich aus der grossen Widerstandskraft der Metallzunge im Kampfe um ihren Eigenton erklärt, während die, eines Eigentones bare Luftzunge sich jeder Variation der Schwingungen der Luftsäule widerstandslos anschliesst.

Den Beweis der Geringfügigkeit des thermischen Einflusses auf Zungenpfeifen liefert das Nichtentstehen von Schwebungen, wenn man den Schallkörper einer solchen Pfeife mässig erwärmt, und deren Ton mit einer anderen Pfeife, mit der sie vor der Erwärmung im Einklange stimmte, vergleicht. Benützt man zu diesem Vergleiche eine Zinn- oder Labialpfeife, und erwärmt diese im geringsten, so entstehen, wie bekannt, die Schwebungen sofort.

Die Verstärkung und Fülle, welche der Zungenton durch Schallkörper erfährt, ist eine ansehnliche; als Beweis dient uns unsere Federspule (Strohhalm), wenn wir sie mit einem Schallkörper verbinden, und ebenso jede andere Zunge. Der Klang einer Zungenpfeife — zumal einer aufschlagenden — besitzt eine Schallkraft und einen Glanz, die durch Labialstimmen nie erreicht werden können. Sie sind grösseren Orgeln geradezu unentbehrlich, wiewohl die Verbindung von Zungen- und Labialpfeifen der Reinheit der Stimmung einer Orgel, soweit eine solche überhaupt möglich ist, in Folge des verschiedenen Maasses, in welchem sie durch die Temperatur alterirt werden, nichts weniger als förderlich ist.

Dass aber eine Orgel im günstigsten Falle nur bei genau demselben Wärmegrade, bei welchem sie eingestimmt wurde, rein stimmen kann, wird man sofort einsehen, wenn man sich erinnert, dass Labial-

pfeifen bei Zu- oder Abnahme der Temperatur um einen Grad Celsius um 1·6 Schwingungen höher oder tiefer werden, was bei Zungenpfeifen weitaus nicht der Fall ist.

Trägt auch die Mensur der Zunge, wie schon erwähnt, zur Charakteristik des Tones bei, so hängt diese doch in noch viel bedeutenderem Masse von der Form und Länge der Schallkörper ab. Die der Schallkraft entschieden günstige Gestalt der Röhre ist die umgekehrt kegel- oder pyramidenförmige. Mit zunehmender

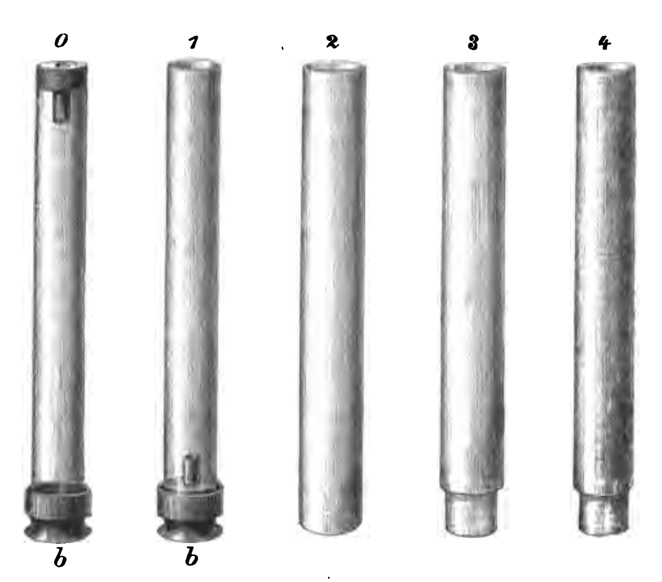


Fig. 196.

Erweiterung nimmt der Ton an Stärke zu, aber an Fülle ab, während mit zunehmender Annäherung an die Cylinder- oder Prismenform die entgegengesetzte Wirkung eintritt.

Die Modificationen, welche Quantität und Qualität des Tones durch die Länge solcher Schallkörper erfahren, sind ähnliche; ausserdem tritt hier noch eine sehr merkwürdige Erscheinung ein[1]), deren

---

[1]) Zu diesen und den folgenden bezüglichen Versuchen dienen vier Messingröhren von je 36 Centimetern und eine (Nr. 2) von 38 Centimetern Länge, die wir mit Nr. 0, 1, 2, 3, 4 bezeichnen wollen (Fig. 196). Nr. 0 und 1 haben einen Durchmesser von 15 Millimetern. Röhre 2 ist um so vieles weiter, dass sie über die Röhre 0 oder 1 mit leichter Reibung geschoben werden kann; 3 und 4 dienen zur Verlängerung von 2. In 0 und

Entdeckung den Gebrüdern Weber zu danken ist. Lässt man nämlich die Länge eines gleich weiten Schallkörpers, beispielsweise eine cylindrische Röhre,[1]) von o bis zu einer Länge anwachsen, bei welcher ihr Eigenton mit dem Zungentone gleichstimmt, so wird man finden, dass eine solche Röhre, bis zur Hälfte ihrer vorbesagten Totallänge an der Tonhöhe durchschwingender Zungen keine merkliche Aenderung bewirken, während mit weiter zunehmender Länge eine immer grössere Vertiefung und zugleich Verschlechterung des Klanges

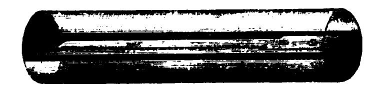


Fig. 197.

platzgreift. Die Vertiefung entspricht bei nahezu voller Länge der vorgenannten Ansatzröhre im günstigsten Falle dem Intervalle der grossen Unterseptime — eine Erscheinung, die auch beim Decken offener Röhren eintritt, indem die Unterocate der offenen Röhre ebenfalls nicht erreicht wird.

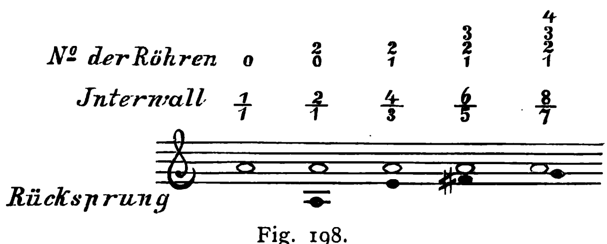


Fig. 198.

Eine weitere Vertiefung des Zungentones ist durch eine Verlängerung der Röhre nicht zu erzielen, denn, sobald diese so weit erfolgt, dass der Resonanzton der Röhre genau mit dem ursprünglichen, d. h. dem

---

1 befinden sich, von durchbohrten Korken gehalten, je ein Zungenpfeifchen (ein sogenanntes Stimm-*a*, Fig. 197), wie solche in Form kleiner Metallcylinder in jedem Musikgeschäfte zu haben sind. Sie werden bei o (Fig. 196) am oberen, bei 1 am unteren Ende derart eingeführt, dass sie, bei *b* mit dem Munde angeblasen, tönen. Behufs leichterer Handhabung versieht man o und 1 bei *b* mit Korkringen, oder man biegt den Rand nach Aussen.

[1]) Die Nummern der Röhren, welche zu diesen Experimenten combinirt werden müssen, sind der Figur 198 zu entnehmen.

Eigentone der Zunge übereinstimmt, springt der vertiefte Ton plötzlich wieder auf die Höhe des ursprünglichen Zungentones zurück und es erlangt hier zugleich der Klang seine grösste Kraft und Fülle. Wird die Länge der Röhre in gleicher Weise verdoppelt, verdreifacht oder vervierfacht, so erfolgt jedesmal der Rücksprung in die erste Tonhöhe, allein die Vertiefungen erreichen nicht mehr das Intervall der Unterseptime sondern das zweitemal nur die Unterquarte, das drittemal die kleine Unterterz, bei der vierfachen Verlängerung aber gar nur mehr die Untersecunde, von welchen Vorgängen wir uns sofort durch Versuche überzeugen können. Es treten sonach Intervalle auf, welche mit dem Eigentone der betreffenden Rohrlänge in dem Verhältnisse arithmetisch fortschreitender ungerader Partialtöne stehen, deren Wellen doppelt so lang sind, als die jeweilige Länge der offenen Röhre, woraus nothwendig folgt, dass wir unsere Röhren als gedeckte anzusehen haben, bei deren verschlossenem Ende die Tonerzeugung erfolgt. Die gefundenen Versuchsergebnisse zeigen nun auch in der That, dass

die erste Vertiefung dem ersten Theiltone, d. i. dem Grund- der einfachen Rohrlänge, also

offen für $a^1 = 36$ Cm.
gedeckt » $a^0 = 36$ »

die zweite Vertiefung, dem zweiten Theiltone der zweimal so langen,

gedeckt $= A_0 = 72$ Cm. (2×36);

die dritte Vertiefung dem dritten Theiltone der dreimal,

gedeckt $= D_0 = 108$ Cm. (3×36);

die vierte, dem vierten Theiltone der viermal,

gedeckt $= A_1 = 144$ Cm. (4×36)

so langen gedeckten Röhre entspricht, dass also die Erscheinung auf dem vollen Walten der Resonanzgesetze beruht.

Hier folgt das Beispiel in Noten:

3 5 3 7 5 3

1 L 2 L 3 L 4 L

Versieht man durchschwingende Zungen statt mit gleich weiten Körpern mit solchen, die sich nach oben erweitern, so ändern sich die Vertiefungserscheinungen im Verhältnisse der Erweiterung, denn es treten hier Vertiefungen und Qualitätsveränderungen des Zungentones viel später ein.

Der noch bis nahe drei Vierttheilen der Röhrenlänge voll und kräftig klingende und erst von da ab immer dumpfer und tiefer werdende Ton erreicht bei Weitem nicht nur die Octave nicht, sondern verschwindet unmittelbar vor dem Rücksprunge vollständig. Nach erfolgtem Rücksprunge erscheint der Ton kräftiger als in der ersten Periode; er spricht aber jetzt schwerer an. Wird ein konischer Schallkörper aufschlagender Zungen über die Grenze, wo Zungen- und Resonanzton zusammenfallen, verlängert, oder — was dasselbe ist — bei gleich langem Körper der Zungenton erhöht, so tritt der Rücksprung zum Zungentone alsbald ein und der Klang wird schlechter, bis der Körper die doppelte Länge erreicht, wo dann wieder der Resonanzton eintritt. Die Ansprache aber wird zögernd.[1]

Alle diese Erscheinungen haben ihren Grund in dem, mit der zunehmenden Länge der Aufsätze sich mehrenden Widerstande, welchen die immer mächtigere und deshalb schwerer in Bewegung zu setzende Luftsäule der Arbeitskraft der Zunge entgegenstellt. Diese Kraft wird mehr und mehr paralysirt, je länger die Luftsäule wird, je mächtiger demzufolge ihre Schwingungen, und je weiter sich diese von jenen der Zunge entfernen, welch' letztere, so lange sie kann, die ihr aufgezwungene Bewegung mitmacht, bis endlich gegenseitige Aufhebung der Kräfte und damit der Stillstand der Bewegung eintritt. —

Nach den vorangegangenen Betrachtungen wird es nicht schwer fallen, die Cardinalfrage: Wie entsteht der Zungenton? die jetzt an uns herantritt, zu beantworten, d. h. sich von dem hiebei stattfindenden, complicirten Vorgange eine richtige Vorstellung zu machen.

Dass der Eigenton der Zunge und die Resonanz des Aufsatzes nicht als die ausschliesslichen Factoren der mächtigen Schallkraft einer Zungenpfeife angesehen werden können, lehrt bezüglich der Zunge der einfache Versuch, sie durch Zerren oder, isolirt, durch

---

[1]) Wird demonstrirt.

Bogenstrich zum Tönen zu bringen (Fig. 189). Man wird einen äusserst schwachen Klang erhalten. Da aber die Stärke der Resonanz einer Röhre nur im Verhältnisse zur erregenden Kraft stehen kann, so ist auch dem Schallkörper die Tonfülle der Zungenpfeifen nicht zuzuschreiben. Diese lässt sich mithin nur aus den intermittirenden Stössen erklären, welche die durch die Schwingungen der Zunge in ihrer continuirlichen Strömung gehinderte, verdichtete Luft auf die Luftsäule des Schallkörpers ausübt.

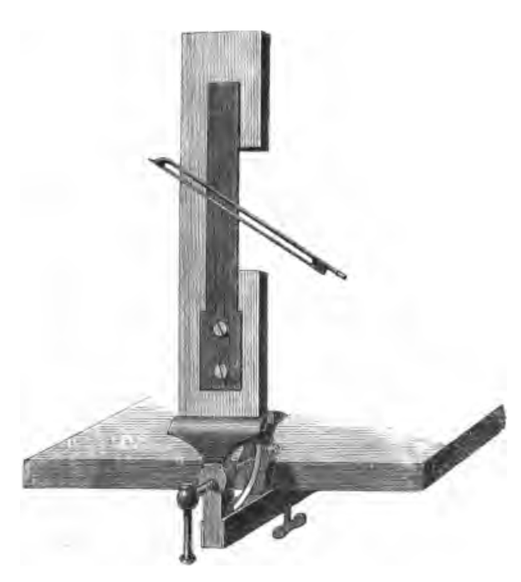


Fig. 199.

Die Kraft dieser Stösse erklärt sich aus ihrer Plötzlichkeit, da die Zunge in dem Momente, wo sie in die Ebene des Plattenausschnittes eintritt, diesen völlig verschliesst, die Strömung der Luft also auch zum völligen Stillstand zwingt. Sobald nun die Zunge vermöge der, durch die Verdrängung aus ihrer Ruhelage geweckten Elasticität zurück zu schwingen beginnt, worin sie von dem in die entstehende Spalte sofort, man möchte sagen, keilartig eindringenden Wind unterstützt wird, wird nothwendig ein intensiver, stossartiger Luftstrom durch den Ausschnitt seinen Weg sich bahnen.

Ebenso leuchtet ein, dass diese Luftstösse um so intensiver werden müssen, je vollständiger die Zunge dem Winde den Weg versperrt, wie solches bei den aufschlagenden Zungen, von welchen alsbald die Rede sein wird, der Fall ist, und wovon auch der, die Pfeifen mit durchschlagenden Zungen an durchdringender Kraft und Schärfe übertreffende Klang der sogenannten aufschlagenden Rohrwerke[1]) herrührt. —

[1]) Orgelbauer bezeichnen mit diesem Ausdrucke im Allgemeinen alle Arten von Zungenstimmen.

Wir wissen, dass die Schwingungen der Zunge, beziehungsweise die hieraus resultirenden intermittirenden Luftstösse die Resonanz der Röhre wecken, deren Luftsäule dadurch in eine stehende Wellenbewegung geräth, die ein solches Kraftmass erlangt, um die beiden Factoren, denen sie ihre Bewegung verdankt, vollständig zu beherrschen, indem sie es jetzt ist, die das Tempo bestimmt, in welchem die Schwingungen der Zunge und damit auch die Stösse der Luft zu erfolgen haben. —

Wie aber entstehen die Schwingungen der Zunge? Sie können bekanntlich sowohl durch Verdichtung wie durch Verdünnung der Luft eingeleitet und unterhalten werden. Bei der Zieh- und Mundharmonika und ähnlichen Instrumenten gelangt Druck- und Saugwind, bei amerikanischen Harmoniums (sogenannten Cottage-Orgeln) letzterer zur Anwendung. Wir werden unsere Betrachtungen auf den Druckwind als den bei den Zungenstimmen der Orgel und bei den Blasinstrumenten ausschliesslich gebräuchlichen beschränken.
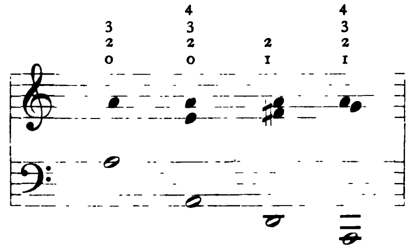
Die Zunge (worunter wir in der folgenden Erörterung die durchschlagende zu verstehen haben), welche in ihrer Ruhelage der Richtung, in welcher sie vom Winde getroffen wird, derart zugekehrt ist, dass sie von der Ebene des Ausschnittes etwas absteht, wird durch den Wind, der, da er zunächst in die Spalte eindringt, zwischen Zunge und Ausschnitt eine momentane Verdünnung erzeugt, immer weiter gegen den Ausschnitt gedrängt, bis sie in denselben eintritt und ihn dadurch völlig verschliesst. In diesem Augenblicke beginnt jedoch, wie schon zuvor ausgeführt wurde, das Zurückschwingen der Zunge, worauf sich die Vorgänge erneuern.

Da nun, vermöge dieser Vorgänge vor der Zunge, in Folge der durch die intermittirenden Luftstösse entstehenden abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen nothwendig Wellenbewegungen stattfinden, so werden aus gleichem Grunde solche Bewegungen auch hinter der Zunge vorkommen müssen, die mithin ebenfalls eines Raumes bedürfen, um sich vollziehen zu können. Diesen Raum bildet, wenn wir Zungen mit dem Munde anblasen, die Mundhöhle; bei orgelartigen Instrumenten mit freischwingenden oder aufschlagenden Zungen: die Windlade; bei der menschlichen Stimme: die Luftröhre. Werden Zungen mit Schallkörpern versehen, so bedürfen sie eigener solcher Räume, in welche der verdichtete Wind eintritt, und innerhalb welcher die Zungen ihre Schwingungen voll-

führen. Diese Räume, die man in der Orgelsprache Stiefeln nennt, müssen reichlich bemessen sein, um die Bildung von Wellen wechselnder Dichtigkeit auch in diesem Raume zu ermöglichen. An der zu engen Bemessung dieser Räume liegt es hauptsächlich, wenn Zungenstimmen matt klingen oder zögernd ansprechen.

Die hemmenden Einflüsse, welche zu enge, zu kurze oder auch zu lange Anblaseröhren, beziehungsweise die von ihnen umschlossenen Luftsäulen sowohl an und für sich, wie auch in Wechselwirkung mit den Resonanzröhren auf die Schwingungen der Zungen, insbesondere der durchschwingenden üben, und welche Schwingungen man im wahren Sinne des Wortes »erzwungene« nennen muss, äussern sich in mannigfachen, sehr interessanten Erscheinungen, die ich Ihnen jetzt vorführen werde, und mit welchen Versuchen wir unsere heutige Unterhaltung schliessen wollen. Wir bedienen uns hiezu des früher benützten Apparates (Fig. 196). — So wird man bei einer solchen Länge des Rohres, bei welcher die Vertiefung des Zungentones beginnt, der Zunge, mag man sie bei einem beliebigen Rohrende anblasen oder ansaugen, einen Ton abgewinnen, was sonst nicht möglich ist. — Bei einer anderen Länge der Röhre und starkem Windzufluss wird es in der Nähe des jeweiligen Rücksprunges gelingen, zwei Töne (Quarte, Terz oder Secunde) zugleich hervorzurufen. (Siehe die drei letzten Beispiele in Figur 198.)

Bei noch stärkeren Blasen wird der Differenzton dieser Intervalle auftreten:



Diese gleich den Obertönen der natürlichen Zahlenordnung folgenden Untertöne sind Differenztöne[1]):

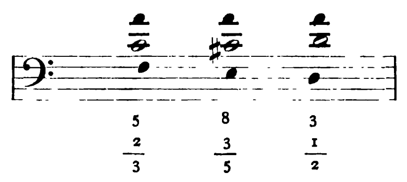
$$\left(\frac{\frac{2}{1}\quad\frac{4}{3}\quad\frac{6}{5}\quad\frac{8}{7}}{1\quad\;\, 1\quad\;\, 1\quad\;\, 1}\right)$$

und den Längen der Röhren proportional.

---

[1]) Ueber dieselben später ausführlich.

Weiters lassen sich mit den Röhren o und 2 die Unter-Decime, -Undecime und -Duodecime hervorrufen, welche Intervalle von ihren Differenztönen (c^1, cis^1, d^1) begleitet werden, wie das nachstehende Beispiel dies darstellt.



Auch sehr hohe Partialtöne kommen auf diese Weise zu Stande; so mit den Röhren o und 2 das cis^4 und mit den Röhren 1 und 2 das dis^2. Auf der Wechselwirkung zwischen Rohrlänge und Windstärke beruht endlich auch die Compensation der Zungenpfeifen, welche erfolgt, wenn der Resonanzton des Schallrohres zum Eigenton der Zunge in ein solches Verhältniss gebracht wird, dass das Sinken des Zungentones bei zunehmendem Winddrucke durch das aus gleichem Grunde erfolgende Steigen des Resonanztones paralysirt wird, eine Aenderung der Tonhöhe also nicht eintreten kann.

Musikalisch praktische Verwendung hat diese von den Gebr. Weber ersonnene Compensationstheorie nicht gefunden, nachdem in Orgeln variabler Winddruck nicht vorkommt, in Instrumenten aber, in welchen dieser angewendet wird (wie Harmonium, Ziehharmonika u. s. w.), die Zungen keine Schallkörper haben.

Zum Schlusse unserer Betrachtungen der durchschwingenden Zungen sei der Vollständigkeit wegen noch erwähnt, dass dieselbe, mit einem kleinen Platinplättchen und mit elektro-magnetischen Contact-Vorrichtungen versehen, geeignet ist, gleich einer Stimmgabel, das phonische Rad (siehe Anhang) in Rotation zu erhalten, beziehungsweise mittels desselben die eigene Schwingungszahl zu registriren.

---

30. Vortrag.

(Zungen, Fortsetzung. — Blasinstrumente.)

Alle unsere bisherigen Betrachtungen galten der Function der durchschwingenden Zunge. Wie nun verhält es sich mit der aufschlagenden Zunge, die, breiter als die Spaltöffnung, auf die Ränder der letzteren schlägt und dadurch die Spalte schliesst? Eine kurze Ueberlegung wird uns sagen, dass die Vorgänge hier genau dieselben sind, wie in dem Augenblicke, in welchem die durchschwingende Zunge in der Ebene ihres Ausschnittes angelangt ist und diesen dadurch absperrt. Die verdichtete Luft, nachdem sie, durch die Spalte entweichend, eine Verdünnung hinter sich zurücklässt, drückt nun die Zunge an den Rand der Spalte, von der sie vermöge ihrer Elasticität zurückschwingt, wodurch ein neuerliches Entweichen der Luft durch die wieder geöffnete Spalte ermöglicht wird. —



Fig. 200.

Trotz des scheinbar vollen Uebereinkommens dieses Vorganges mit jenem bei durchschwingenden Zungen ergeben sich nichtsdestoweniger phonische Unterschiede von Belang zwischen diesen beiden Gattungen.

Zunächst ist leicht einzusehen, dass durch das Aufschlagen der Zunge auf den Spaltrand (die sogenannte Kelle, Fig. 200) ein Geräusch erzeugt werden muss, welches geeignet ist, den Klang zu charakterisiren, nachdem das Aufschlagen auch ohne jeden Hinzutritt des Windes einen gut hörbaren, hellen Resonanzton des Schallkörpers hervorruft, wovon man sich leicht überzeugt, wenn man die Zunge mit dem Fingernagel oder einer Messerspitze hebt und loslässt.

In der That lässt sich das Scharfe und schmetternd Glänzende des Trompeten- und Posaunenklanges in Orgelstimmen nur mit aufschlagenden Zungen erzielen, wozu allerdings auch die weiten Schallkörper vermöge der Helligkeit ihres Klanges wesentlich beitragen.

Weiters belehrt uns der einfachste vergleichende Versuch mit und ohne Anwendung von Schallkörpern, dass diese zur Ausbildung des Tones aufschlagender Zungen weit unentbehrlicher sind als bei durchschwingenden. Allerdings wird auch eine aufschlagende Zunge ohne Schallkörper tönende Schwingungen vollführen. Allein deren Klang ist gänzlich verschieden von dem wohlausgebildeten Tone freier, durchschlagender Zungen; er nähert sich mehr dem Gekreische als dem Tone und ist in der Tonhöhe äusserst veränderlich, weil für die geringste Schwankung des Winddruckes empfindlich, wie man sich durch Versuche leicht überzeugen kann.

Aus diesem Grunde sind aufschlagende Zungen als freie, d. h. ohne Resonanzröhre, zu musikalischer Verwendung ungeeignet.

Im Uebrigen folgen die mit Körpern versehenen aufschlagenden Zungen, deren »Stiefel« vermöge der kürzeren Luftsäule der Aufsätze kleiner sein, ja bei hochgebauter Windlade ganz entfallen können, weil eine solche den Bewegungen der Wellen hinreichenden Raum gewährt, — denselben Gesetzen, wie die durchschlagenden.

Dass durch die erwähnten Wellenbewegungen in den Windräumen (Stiefel und Windlade) ebenfalls stehende Schwingungen sich entwickeln und bis in das Gebläse zurück verpflanzen, beweisen die in allen diesen Räumen deutlich fühlbaren mechanischen Erschütterungen, welche besonders die grossen Pfeifen hervorbringen, und die von den Schwingungen der Luftsäule im Aufsatze nicht allein herrühren können, weil sie auch an Instrumenten mit freischwingender Zunge wahrgenommen werden.

Dadurch aber werden auch diese Räume zu Resonanzräumen, was sich einmal durch den Unterschied des Klanges zwischen einer auf der Windlade und einer mit den Lippen oder auf andere Weise, jedoch aus einiger Entfernung angeblasenen freischwingenden Zunge deutlich erkennen lässt.

Die Wichtigkeit, ja Nothwendigkeit eines Luftraumes hinter der Zunge wird aber auch durch den Umstand bewiesen, dass, während der Ton solcher Zungen mit der Grösse dieses Raumes an Fülle und Kraft zunimmt, derselbe bei Verkleinerung dieses Raumes zunehmend tiefer wird und immer schwächer, schwerer, ja endlich gar nicht anspricht. So lässt sich eine Zunge mittels eines langen engen Schlauches nicht zum Tönen bringen, wohl aber,

wenn zwischen demselben Schlauche und der Zunge ein grösserer Luftraum, etwa ein Glascylinder, eingeschaltet wird.[1])

Wir wollen die Betrachtungen unseres Gegenstandes mit zwei allgemeinen Bemerkungen schliessen. Die eine bezieht sich auf die Mensur der Zungen, die andere auf die Intensität ihres Klanges, beides mit Rücksicht auf ihre Tonhöhe.

In noch geringerem Masse, als bei den Labialpfeifen die Mensur der Röhre, sind die Grössenverhältnisse der Zungen für deren Tonhöhe massgebend. Zwei ganz gleich lange, breite und dicke Zungen können sehr verschiedene Töne geben, wenn die eine an der Spitze und die andere genau um so vieles am Rücken dünner ist. Je schwächer die Spitze im Vergleiche zum Rücken erscheint, um so schneller wird sie schwingen können und um so höher wird folglich der Ton sein; wogegen, wenn der Rücken dünn ist, die Spitze relativ schwerer sein, mithin langsamer schwingen, das Resultat also ein tieferer Ton sein wird. Auf diese Weise können wir mit einer langen Zunge einen höheren, mit einer kurzen einen tieferen Ton erzeugen.

Auf den Charakter und die Intensität des Klanges haben die Dimensionen der Zunge hingegen einen sehr bedeutenden Einfluss.

Was das Verhalten der Schallkraft der Zungenpfeifen zu ihrer Tonhöhe anbelangt, so nimmt jene mit Zunahme der letzteren rasch ab. Aus diesem Grunde bekommen, zumal bei durchschwingenden Stimmen, die höheren Töne doppelt lange Schallkörper, wodurch die Tonfülle wesentlich vermehrt wird, während die Präcision der Ansprache in dieser Lage durch die längere Luftsäule eine Beeinträchtigung nicht erfährt.

Dagegen wird in den tieferen Lagen die Kraft und Fülle des Tones nicht beeinträchtigt durch Schallkörper, deren Länge nur zwei Drittel, selbst ein Drittel der Wellenlänge des Grundtones, also der Quinte oder Duodecime gleichkommt.

---

[1]) Das Experiment wird mit einem sogenannten Stimm-*a*[1] (Fig. 201 *a*) ausgeführt, welches von einem durchbohrten und am entgegengesetzten Ende mit einem dünnen Messingröhrchen versehenen Korke gehalten wird. Man bläst dasselbe zuerst mit einem kürzeren, dann immer mehr verlängerten Gummischlauch an, bis es nicht mehr zum Tönen gebracht werden kann. Nun führt man das Instrumentchen sammt dem Korke in einen kurzen Glascylinder (Fig. 201 *b*) ein, der am anderen Ende gleichfalls mit einem Korke geschlossen wird, welcher durchbohrt und ebenfalls mit einem Röhrchen versehen ist, an welches derselbe Schlauch befestigt wird. Jetzt angeblasen, wird der Ton in voller Kraft erklingen.

Wir gelangen nun zur Betrachtung der Blasinstrumente mit Ausschluss der Flöte, von welcher bereits die Rede war.

Wie die Analogie der Erregungsart von der monophonen (eintönigen) Labialpfeife zur polyphonen (vieltönigen) Flöte führte, so leitet die Zungenpfeife unmittelbar zur Betrachtung aller übrigen Blasinstrumente, da diese mit Ausnahme der Flöte insgesammt die schwingende materielle Zunge zum Tonerreger haben.

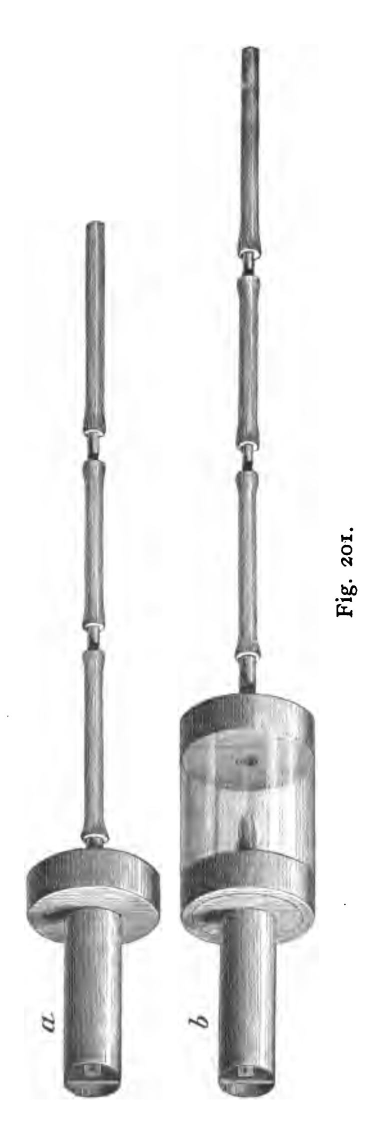


Fig. 201.

Nachdem diese Instrumente bestimmt sind, mit einer und derselben Röhre eine Reihe verschieden hoher Töne hervorzubringen, so müssen auch die Zungen derartig beschaffen sein, dass ihre Schwingungen sich den Schwingungszahlen aller Töne, die das Instrument umfasst, auf das Innigste anschliessen können. Demgemäss ist erforderlich, dass die Zunge zwar ebenso elastisch, aber minder starr sei, als die Metallzunge, und dass sie augenblicklich in jene Lage gebracht werden könne, die ihr gestattet, die der jeweiligen Schwingungszahl des hervorzubringenden Tones entsprechenden Vibrationen vollführen zu können.

Ersteres wird erreicht, indem man die Zungen, so weit sie nicht aus den Lippen des Bläsers selbst bestehen, aus elastischem, aber nachgiebigem Rohrholze erzeugt und nach Bedarf mehr oder weniger dünn ausarbeitet. Solche Zungen werden von den Bläsern »Blätter« oder »Röhrchen« genannt, je nachdem sie aus einem oder zwei Blättchen bestehen. Starke Zungen

geben kräftigeren Ton, wogegen schwache eine leichtere Ansprache gestatten; zwischen diesen Extremen liegen viele Nuancen, aus welchen der Künstler die, seinem Geschmacke oder dem jeweiligen bestimmten Zwecke entsprechende wählt.

Der anderen Bedingung muss durch die passende Stellung und den Druck der Lippen gegen die »Blätter« oder »Röhrchen«, dort aber, wo sie, wie bei Blechinstrumenten, selbst die schwingende Zunge bilden, durch Spannung entsprochen werden.

Es kommen zur Verwendung bei den Clarinetten: auf eine, ihrer Form nach »Schnabel« genannte Anblaseöffnung aufschlagende, einfache Rohrblätter; bei Oboën und Fagotten: doppelte, einander zugekehrte und gegeneinander schwingende, an einem Metallröhrchen befestigte Blätter. Die Vibrationen der Lippen, die, gleich den Oboë- und Fagottröhren, gegeneinander schwingen, erfolgen in kesselartigen Mundstücken aus Metall, Bein, Hartgummi oder Glas und können beim Gebrauche der letzteren beobachtet werden. [1])

Der Vorgang bei der Tonerzeugung ist genau derselbe, wie bei den Zungenpfeifen. Das genetische Moment bilden hier wie dort die periodischen Unterbrechungen des hier vom Bläser, dort vom Gebläse erzeugten Stromes verdichteter Luft.

Was insbesondere diesen Vorgang bei Clarinetten, Oboën und Fagotten anbelangt, so gleicht er im Wesentlichen dem bei aufschlagenden Zungenpfeifen geschilderten. Die Lippen des Bläsers drücken das Clarinettblatt an die Schnabelebene, beziehungsweise die Blätter des Oboë- oder Fagottröhrchens aneinander. Erfolgt der erste Athemstoss, so werden die Lippen so weit nachgeben, um der verdichteten Luft zwischen Blatt und Schnabel, beziehungsweise zwischen beiden Blättern der Röhrchen den Eintritt in das Tonrohr zu ermöglichen; damit ist aber in diesem Augenblicke die Verdichtung zu Ende, und die Blätter kehren wieder an ihre Stelle zurück, werden aber im nächsten Augenblicke durch die inzwischen zurücklaufende Welle des Tonrohres von einander getrieben, wodurch der inzwischen wieder verdichteten Athemluft der neuerliche Durchgang geöffnet wird. Diese sich gleichmässig wiederholenden Durchgänge bilden periodische Luftstösse, welche die Resonanz des Tonrohres wecken und mit der, seiner jeweiligen Wellenlänge, beziehungsweise Schwingungszahl ent-

---

[1]) Alle genannten Anblasevorrichtungen werden vorgezeigt und erklärt, desgleichen die folgend erwähnten Blasinstrumente.

sprechenden Schnelligkeit aufeinander folgen. Es bleibt demgemäss auch der Lippendruck des Bläsers, zumal des Oboisten und Fagottisten, ziemlich unverändert, gleichviel, ob es sich um hohe oder tiefe Töne handelt, da die Lippen den abwechselnden Annäherungen und Entfernungen der vibrirenden Blätter passiv folgen. Clarinettisten müssen je nach der Tonhöhe das Blatt kürzer oder länger abgrenzen, und auch den Lippendruck entsprechend modificiren, worüber später noch Einiges bemerkt werden wird.

Die Klangfarbe dieser Instrumente rührt wesentlich von ihren Anblasevorrichtungen her. Der Clarinettklang ist in den tieferen Tonlagen in Folge des Aufschlagens des Blattes auf die unnachgiebige Schnabelebene, besonders im forte, hart, und wird nur dadurch gemildert, dass die Töne, dem Gesetze gedeckter Röhren folgend (worüber sogleich Näheres), doppelte Wellenlänge haben, also noch einmal so tief sind, als sie mit Rücksicht auf die Länge des Tonrohres, beziehungsweise auf die Entfernung der Tonlöcher vom Anblaseende sein sollten. In den höheren Tonlagen kommt es wegen der kleineren Schwingungsweite der schnelleren Vibrationen nicht zu eigentlichem Aufschlagen der Zunge an den Schnabel, ausgenommen bei fehlerhafter Lippen- oder Luftpressung, wodurch die sogenannten »Gixe« entstehen. Der scharf schwirrende, um nicht zu sagen: plärrende Klang der Oboë und des Fagottes hat in dem Aneinanderprallen der Doppelblätter seinen Grund. —

Zur Hervorbringung der Tonstufen dienen bei den Holzblasinstrumenten Tonlöcher, die theils unmittelbar mit den Fingern, theils durch Vermittlung von Klappen geöffnet und geschlossen werden, und die in Bezug auf die Tonhöhe dieselbe Wirkung haben, als würde die Röhre an dieser Stelle abgeschnitten, mithin die tönende Luftsäule um dieses Stück verkürzt.

Vergleichen wir die, nach der reducirten Wellenlänge des Grundtones theoretisch berechneten Längen der Röhren der Flöte, Oboë und des Fagottes, sowie der, später eingehender zu betrachtenden Blechblasinstrumente mit jener der Clarinette[1]), so finden wir, dass

[1])	Bohrung	Länge	Mittl. Durchm.	Tiefster Ton	Wellenlänge
		in Millimeter			Millimeter
Clarinette in B . .	cylindrisch	560	14	d^0	1170
Flöte	verkehrt konisch	690	14	b^0	738
Oboë	konisch	655	14	h^0	696
Fagott	konisch	2800	20	B_1	2950

der Ton der letzteren um nahezu eine Octave tiefer klingt, woraus wir schliessen müssen, dass wir es hier mit einer gedeckten Röhre zu thun haben. Dieser Schluss wird bestätigt, wenn wir den Versuch machen, den nächsten Partialton der Clarinette hervorzurufen. Es wird dies die Duodecime sein und wir würden uns vergebens bemühen, den Grundton in die Octave zu überblasen, wie solches bei allen übrigen Blasinstrumenten ohneweiters gelingt.[1])

Diese letzteren befolgen also, gleich den offenen Röhren, beim Ueberblasen die Reihe der natürlichen Zahlen und man nennt sie gemäss des Intervalles der ersten Ueberblasung octavirende Instrumente, während die Clarinette, als gedeckte Röhre, nur ungeradzahlige Partialtöne hat, und man sagt deshalb — wiewohl nicht zutreffend — sie quintire.

Der Grund dieser divergenten Erscheinung liegt, wenn auch theilweise, doch nicht so sehr in der Beschaffenheit der Anblasevorrichtungen (dies beweisen die Saxophone, welche, wiewohl mittels Clarinettschnabels angeblasen, octaviren), als in der inneren Form der Röhren, oder — was dasselbe besagt — in der Bohrung. Diese hat bei allen Blasinstrumenten — die Clarinette und die Flöte ausgenommen, welch' letztere jedoch, als nicht zu den eigentlichen Zungeninstrumenten zählend, hier nicht weiter in Betracht kommt — die Form eines vom Anblaseende gegen das entgegengesetzte Rohrende sich erweiternden Kegels, während die Clarinette streng cylindrisch gebohrt ist. Diese Form begünstigt die Bildung des Schwingungsknotens am Anblaseende und macht die Clarinette zu einer gedeckten Pfeife. Eine konische Röhre, mittels des Clarinettschnabels angeblasen, gibt auch die geraden Obertöne, und hierauf fusst das Princip der Saxophone, Instrumente, welche in deutschen Orchestern nicht Eingang gefunden haben.

Oboë und Fagott, wiewohl sie octaviren, müssen als theilweise gedeckte Pfeifen angesehen werden, deren Knoten näher dem Anblaseende liegt und die aus diesem Grunde um nahezu eine Terz tiefer klingen, als es ihren Längen gemäss sein sollte, weshalb auch die reducirten Längen der Röhren dieser Instrumente noch um den Betrag der Wellenlänge dieses Intervalles verkürzt werden müssen. Hieraus erkennt man zugleich, wie vielerlei Factoren auf die Ton-

---

[1]) Wird demonstrirt.

höhe von Instrumenten letzterer Art Einfluss haben: so der jeweilige Wärmegrad der Luftsäule, die verschiedene Pressung der Lippen, wodurch der Ton um beiläufig ein Viertel in die Höhe getrieben oder sinken gemacht werden kann, die Länge des Anblaseröhrchens überhaupt und der Betrag, um welchen es mehr oder weniger tief ins Instrument eingesetzt wird; und man wird wohl hauptsächlich nur in dem durchdringenden, das Tonchaos eines stimmenden Orchesters dominirenden Klange der Oboë den Grund zu suchen haben, dass ein Instrument von so ausserordentlich unverlässlicher Tonhöhe, wie dieses, zum Einstimmen der Orchester benützt werden konnte. Heute ist durch die Ihnen bereits bekannte, in allen grossen Orchestern eingeführte elektrische Stimmgabel, die Oboë dieser Functionen enthoben.

Die eben erwähnte Biegungsfähigkeit des Oboë- und Fagotttones bietet gewandten Spielern das Mittel zur reinsten Intonation, beziehungsweise zur Bezwingung diesfalls dem Instrumente anhaftender Fehler. Im nächsten Vortrage wollen wir fortfahren, uns mit den Blasinstrumenten näher bekannt zu machen.

---

31. Vortrag.

(Blasinstrumente, Schluss. [1])

Bei der Oboë und dem Fagott, die wir nun etwas eingehender betrachten wollen, werden die Tonfolgen, wie bei der Flöte, theils mittels der unmittelbar mit den Fingern verschliessbaren Tonlöcher, theils mittels Klappen hervorgebracht. Die Grundtöne der Oboë erstrecken sich bis cis^2 und die des Fagotts bis f^0. Durch Ueberblasungen in die Octave oder Duodecime entstehen die folgenden Töne. Die Grundstimmung der Oboë ist D-dur, jene des Fagotts C-dur (die Oboë hat 6, das Fagott 5 Tonlöcher für die Finger).

Der Umfang der Oboë reicht chromatisch von h^0 bis f^3, jener des Fagottes vom Contra-*B* bis f^2. Der grosse Umfang des letzt-

[1]) In der Beilage IX sind Stimmung, Umfang und Notirung aller gebräuchlichen Blasinstrumente dargestellt.

genannten Instrumentes und die Leichtigkeit, mit der es überbläst, erklärt sich aus seiner im Verhältnisse zur Länge (2·8 Meter) ausserordentlich engen Mensur, deshalb kann es auch jenes Hilfsmittel entbehren, dessen Oboë und Clarinette bedürfen, um die verhältnissmässig viel kürzere Luftsäule zu Theilschwingungen zu veranlassen. Dieses Hilfsmittel besteht in einer, in der Gegend des Schwingungsbauches des zweiten Partialtones angebrachten kleinen, mit einer Klappe verschliessbaren Oeffnung, welche die Franzosen l'âme, die Seele, nennen und wodurch das Ueberschlagen in die Octave, beziehungsweise Duodecime befördert wird. —

Eine Unterart der Oboë ist das englische Horn, dessen Stimmung eine Quinte tiefer steht; die Unterart des Fagottes, das Contrafagott, reicht um eine Octave tiefer als jenes. Die früher vorgekommenen sogenannten Quintfagotte sind längst ausser Gebrauch.

Abweichend von diesen Instrumenten ist die Tonfolge der Clarinette, die als gedeckte Röhre sogleich in die Duodecime überbläst, daher statt 12, 19 chromatische Grundtöne erzeugen muss, bevor die erste Ueberblasung eintreten kann. Die Clarinette, deren Bohrungsdurchmesser 14 Millimeter und deren mittlere Länge 560 Millimeter beträgt, hat 7 Tonlöcher und 15 Klappen. Ihr Tonumfang reicht chromatisch vom kleinen *e* bis zum dritten gestrichenen g^3 und gehört zu den sogenannten transponirenden Instrumenten.

Was man unter diesen versteht, soll hier in Kürze erklärt werden.

Die moderne Musik fusst — und dies mit Recht — auf der *C*-Tonart und betrachtet alle übrigen Tonarten lediglich als Transpositionen von *C*. So ist *Cis*- oder *Des*-dur ein um einen halben Ton, *As*- oder *Gis*-dur ein um acht Halbtöne erhöhtes *C*-dur.

Diese Auffassung leitet ihre Berechtigung daher, dass man mit der einfachsten Potenz, nämlich mit jener der Zahl 2 nothwendig zu einem Tone von 32 einfachen Schwingungen in der Secunde gelangt, der, wenn er durch eine Pfeife dargestellt wird, eine Luftsäule von 32 Fuss Länge erfordert, daher auch das 32füssige oder Sub-Contra-*C* genannt wird, und welchen Ton, da er zugleich die unterste Grenze unterscheidbarer Klänge bildet, man als Ausgangspunkt des gesammten Tonsystems angenommen hat.

Instrumente nun, deren Töne nicht so klingen, wie sie geschrieben sind, pflegt man transponirende zu nennen.

Streng genommen gehören oder vielmehr gehörten hierher die sogenannten Naturhörner und Naturtrompeten, auf welchen nur die ihrer Grundstimmung entsprechenden Partialtöne — und auch diese vielfach unrein — hervorzubringen waren, die also ihre Grundstimmung ändern müssen, um Töne zu gewinnen, die mit der früheren Grundstimmung nicht darzustellen waren.

Diese Schwierigkeit ist nun seit der Erfindung der Ventile, wodurch diese Instrumente chromatisch geworden sind, weggefallen. Trotzdem bedient man sich auf diesen, sowie auch auf anderen sogenannten transponirenden Instrumenten, wie: Clarinett, englisch Horn u. s. w. stets nur der *C*-Tonart; allein die Töne klingen nur dann schriftgemäss, wenn man sich des *C*-Hornes, der *C*-Trompete, der *C*-Clarinette bedient.

Bekommt das Instrument eine andere Grundstimmung, so wird die Note *C* nicht mehr als *C*, sondern beispielsweise auf dem *D*-Horn als *D*, auf der *B*-Trompete als *B*, auf der *A*-Clarinette als *A* ertönen, trotzdem der Spieler in allen diesen Fällen dieselbe Embouchure oder dieselben Applicaturen (Griffe) anwendet. — Ein gleiches ist der Fall beim englischen Horne, bei der Alt- und Bassclarinette, dem Bassethorne und den Tuben, die zu den sogenannten transponirenden Instrumenten gezählt werden, wiewohl auch sie die chromatische Tonleiter besitzen.

Verstossen solche transponirende Notirungen überhaupt gegen die Logik des Tonsinnes, so erscheinen sie heute doppelt widersinnig, wo Hornisten (und auch Clarinettisten) — gleichviel welche Grundstimmung vorgeschrieben sei — fast Alles auf dem *F*-Horn oder der *B*-Clarinette blasen (freilich nicht immer zu Nutz und Frommen der vom Componisten beabsichtigten Klangfarbe).

Man besehe nur folgendes Beispiel. — Soll diese für das *D*-Horn geschriebene Stelle [Notenbeispiel] auf dem *F*-Horne dargestellt werden, so muss der Bläser [Notenbeispiel] greifen, damit die Töne [Notenbeispiel] erscheinen. Ebenso verhält es sich mit den Clarinetttranspositionen.

Was das Verhältniss des Tonumfanges zur Grundstimmung betrifft, so ist dieses ein verschiedenes.

So reichen die Clarinetten eine kleine Sexte unter die Grundstimmung ihrer Tonleiter; ihr tiefster Ton ist also nicht der Grundton ihrer Tonart. — In gleicher Weise verhalten sich die Bassclarinette (in *B*) und die Altclarinetten (in *F* und *Es*). Die Tuben reichen einen halben Ton unter die Tonleiter der Grundstimmung.

Nicht immer aber bilden Grundstimmung und Umfang das Merkmal eines transponirenden Instrumentes.

So ist die Grundstimmung der Flöte und der Oboë *D*-dur, wiewohl deren Tonumfang bis zum h^0, mitunter bis zum b^0 und a^0 hinabreicht; nichtsdestoweniger klingen ihre Töne schriftgemäss. Auch auf den Posaunen erklingen die Töne schriftgemäss, jedoch wird für die Tenor- und Altposaune in den gleichbenannten Schlüsseln notirt, die übrigens, wie in der modernen Schreibart für das Violoncell, durch den Violinschlüssel ganz wohl ersetzt werden könnten.

Damit soll jedoch keineswegs gesagt sein, dass man sich nur auf die zwei gangbarsten Schlüsseln (Violin und Bass) beschränken solle; es wäre im Gegentheile sehr zu wünschen, dass jeder Musiker alle fünf Schlüsseln geläufig zu gebrauchen verstünde, weil deren Kenntniss nicht nur für das Partiturlesen unerlässlich ist, sondern auch das Transponiren ungemein erleichtert.

Man ersieht aus diesen wenigen Andeutungen, dass das musikalische Schreibsystem noch vielfach ein antiquirtes ist, und es wäre für das Lesen von Partituren gewiss eine grosse Erleichterung, wenn man — wie dies bezüglich des Sopran- und Tenorschlüssels für den Gesang seit Langem geschehen ist, an deren Stelle in der neueren Notation allgemein der Violinschlüssel trat — allmälig auch für die Blasinstrumente statt der Transpositions-Notirung die der wirklichen Klanghöhe einführen wollte, denn in Wahrheit heisst es doch einer musikalischen, mit Tonhöhensinn begabten Natur geradezu Gewalt anthun, wenn ihr zugemuthet wird, die Note *c* zu blasen oder zu greifen und dafür die Note *x* zu hören. Die einzige musikalisch geziemende Art des Transponirens ist diejenige, welche auf der Uebung beruht, Schlüsseln zu lesen, also das geistige Transponiren, welchem zufolge das Stück, das man beispielsweise nach E-dur transponirt, auch in E-dur, d. h. mit den Tasten oder Griffen der E-dur-

Tonart gespielt wird. Diesfalls noch Einiges zu bemerken, sei an anderer Stelle vorbehalten.[1])

Die gebräuchlichsten Arten der Clarinette sind jene mit den Grundstimmungen c^1, b^0 und a^0, dann in Militärorchestern auch es^1 und f^1. — Ferner gehören zu dieser Familie die Altclarinette und das Bassetthorn mit der Grundstimmung f^0, die Bassclarinette in *B* und die in vier Stimmungen gebräuchlichen, vorerst aber nur in französischen Orchestern eingeführten Saxophone, die, wiewohl mit Clarinettschnabel angeblasen, dennoch nicht quintiren, sondern — was in ihrer stark konisch verlaufenden Form begründet ist — octaviren.

Die »Stürze« genannte trichterartige Erweiterung, in welche die Röhren der Oboën und Clarinetten, im geringerem Grade auch jene der Fagotte, auslaufen, hat bei Holzblasinstrumenten auf die Tonhöhe keinen Einfluss, denn der Ton erfährt keinerlei Veränderung, wenn an Stelle der Stürze die regelmässige Bohrung linear fortgesetzt würde. Wohl aber trägt diese Form, die bei Blechinstrumenten eine noch bedeutendere phonische Rolle spielt, zur Fülle der tiefen Töne namentlich bei der Clarinette bei, wie dies durch Versuche erwiesen werden kann.

Dass kein Blasinstrument, welches einer längeren Tonreihe zu dienen hat, in allen Lagen von gleicher Klangstärke und -Farbe sein kann, findet seinen leicht erklärlichen Grund darin, dass mit einer und derselben Mensur hohe und tiefe Töne hervorgebracht werden müssen. Dieses Missverhältniss tritt insbesondere bei der Clarinette in Folge ihrer cylindrischen Bohrung stark hervor, während die konische Bohrung der anderen Instrumente diesen Missstand einigermassen mildert, weil die Schwingungen der hohen Töne in dem engeren Theile der Röhre erfolgen. Bei der Querflöte alten Systems obwaltet das entgegengesetzte Verhältniss. In Folge der verkehrt konischen Bohrung sind die hohen Töne an Schallkraft begünstigt, sprechen aber schwerer an und geben ungenaue Intervalle. Einen anderen misslichen Umstand bei den Clarinetten bildet die Schwierigkeit, eine in allen Lagen reine Stimmung des Instrumentes

---

[1]) Ueber diesen Gegenstand ist in der Leipziger Neuen Zeitschrift für Musik Nr. 7 und 8 1891 ein der Beherzigung werther Aufsatz von Dr. Heitzel erschienen.

zu ermöglichen. Dieses beruht darin, dass hier nicht die reine Octave, sondern die reine Quinte, beziehungsweise Duodecime die festen Grenzen bilden, innerhalb welcher das Tonsystem dieses Instrumentes sich bewegt, und welcher Eigenthümlichkeit zufolge das Stimmungsniveau (Stimmhöhe) desselben gegen die Höhe zu steigt und daher in diesen Lagen mit octavirenden Instrumenten schwebende Einklänge und falsche Intervalle bildet. Dieser, der Natur des Instrumentes nothwendig anhaftende Uebelstand, welchem auch das auf diese Instrumente ebenfalls angewendete Böhm-System nicht namhaft abhilft, lässt sich durch die Geschicklichkeit des Spielers so weit paralysiren, dass es vortheilhafter scheint, den kleinen Rest vorkommender minder reiner Intervalle mit in den Kauf zu nehmen, als akustische Versuche zur Erzielung grösserer Reinheit auf Kosten des in seiner Eigenthümlichkeit durch Nichts zu ersetzenden Clarinettklanges zu machen. —

Sind schon die Mensuren der Holzblasinstrumente im Vergleiche zu jenen der Orgelpfeifen, zu welchen sie sich im Durchschnitte wie 1 : $2^1/_2$ bis 1 : 7 verhalten, sehr enge, so werden sie hierin von jenen der Blechinstrumente noch bei weitem übertroffen. Das am engsten gebaute Blechinstrument, das Naturhorn[1]), das bei einer durchschnittlichen Röhrenlänge von rund 3·9 Metern (für das *F*-Horn), eine mittlere Weite von rund 13 Millimetern hat, verhält sich zur Mensur einer gleich langen Principalpfeife, deren Weite in der Länge 20mal enthalten ist, wie 1 : 15.

Diese auffallende Länge war bei einem Instrumente nothwendig, das, hauptsächlich nur auf die Aliquottöne angewiesen, in die vierte Octave (vergleiche die Tabelle der Obertöne Beilage XI *A*) musste überblasen werden können, um nur in das Tonbereich einer einzigen diatonischen Scala zu gelangen. Um aber die Luftsäule in 16 und mehr Theile zerlegen zu können, musste sie nothwendig auch sehr dünn sein.

---

[1]) Die theoretischen Masse des Naturhornes in den fünf üblich gewesenen Stimmungen sind:

	Länge	Mittl. Durchm.
	in Millimeter	
tief *B*	5900	18·7
D	4685	14·8
Es	4422	14·0
E	4174	13·2
F	3939	12·5

Der Verlust des Grundtones, der weder auf dem Horne noch auf der Trompete hervorgebracht werden kann, ja unter Umständen auch jener des folgenden Partialtones musste ertragen werden, weil sonst die höheren Töne nicht zu erreichen gewesen wären; auch war das Opfer insoferne von keinem Belang, da ja der vollständig fehlenden Zwischentöne wegen das Horn in der Basslage jedenfalls nur die beschränkteste Verwendung ermöglichen würde.

Die diatonische Scala der vierten Octave hatte aber vor Erfindung des später zu erörternden Maschinhornes nicht nur Mängel in Bezug auf die Reinheit der Quarte, sondern es fehlten ihr auch die chromatischen Zwischenstufen. Beiden Mängeln wurde durch das mehr oder weniger tiefe Einführen der Hand in das trichterförmige Ende des Instrumentes, durch das sogenannte »Stopfen« abgeholfen, allerdings nur in unzulänglicher Weise, denn die derartig erzeugten Töne unterscheiden sich auffallend durch ihren gepressten und gedämpften Klang von dem vollen der Naturtöne. Um nun Töne letzterer Art für alle Tonarten zu gewinnen, musste man sogenannte »Setzstücke« anwenden, die, an das Horn angesetzt, die Röhre um so viel verlängerten, als die Wellenlänge des gewünschten Grundtones es erforderte. Man hatte Setzstücke für alle Halbtöne zwischen hoch und tief *B* und sie wurden je nach Erforderniss der jeweiligen Tonart auch während eines Tonstückes gewechselt. Abgesehen von den Veränderungen der Klangfarbe, die sich aus solchen Verlängerungen und Verkürzungen einer und derselben Röhre ergeben mussten, und abgesehen davon, dass auch bei jedem der verschiedenen Setzstücke die unreinen Naturtöne durch Stopfen oder Treiben verbessert werden und daher auch in der Klangfarbe Veränderungen erleiden mussten, konnte der Wechsel zwischen warm geblasenen, daher im Tone höheren, und kalten, also tieferen Setzstücken der Grundstimmung des Hornes in Bezug auf relative Reinheit wenig förderlich sein. Diesem letzteren Uebelstande wurde durch das sogenannte »Inventionshorn« einigermassen abgeholfen. Die Verbesserung bestand in einem, in das Hauptrohr eingeschalteten sogenannten Stimmzuge, der eine Verlängerung und somit eine Vertiefung des Instrumentes um 1 bis 2 Halbtöne ermöglichte, innerhalb dieser Grenze also das Setzstück entbehrlich machte. Der naheliegende Gedanke: diesen Zug leicht beweglich und so zur willkürlichen Vertiefung einzelner Töne geeignet zu machen, führte

zur Erfindung der Ventil- und der späteren Cylinder-Maschine.[1])

Durch die Anwendung dieser Mechanik sind die Blechinstrumente gleichartig chromatisch geworden. Diese Vorrichtung, welche den Zweck hat, Rohrtheile von bestimmter Länge mit dem Hauptrohre derart zu verbinden, dass diese Verbindung augenblicklich hergestellt oder aufgehoben werden kann, wird mit den Fingern einer Hand (gewöhnlich der rechten) in Bewegung gesetzt. Drei solcher, für $^1/_2$, $^2/_2$ und $^3/_2$ Töne bemessener Verlängerungsröhren genügen, um die Lücke einer Quinte auszufüllen, somit nicht nur von der zweiten Octave an die vollständige chromatische Tonleiter mit hinlänglicher Reinheit hervorbringen, sondern auch noch innerhalb der ersten Octave sechs Halbtöne nach abwärts erreichen zu können, wenn man die drei Ventile zuerst einzeln, dann zu zweien, endlich insgesammt gleichzeitig in Thätigkeit setzt, so dass dem Maschinhorne nur die dem Grundtone folgenden fünf Halbtöne fehlen.

Wiewohl sich nunmehr mit der Rohrlänge einer und derselben Grundstimmung in dem eben angedeuteten Umfange alle Töne offen, d. h. ungestopft hervorbringen lassen, so bietet der gleichzeitige Gebrauch von Setzstücken, die jetzt aber auf wenige Tonarten, wie *F*, *E*, *Es* und *D* beschränkt werden, dem Spieler manche technische Erleichterung und dem Componisten mannigfaltige Klangfarben dar. Die differenten Verhältnisse zwischen den verlängerten Röhren und den Längen der Ansatztheile werden jeweilig durch die Stimmzüge, mit welchen sie versehen sind, ausgeglichen. Dass die Stopftöne auch auf dem Maschinhorne hervorgebracht werden können, ist selbstverständlich.

Es bleibt hier noch die Frage übrig, welchen Einfluss die Stürze auf den Klang der Blechinstrumente übt, denn, dass sie im Gegensatze zu den Holzblasinstrumenten, eine solche äussert, lässt sich durch Versuche erweisen. Diese Wirkung besteht in dem schmetternden Klange, der den eng mensurirten, mit weiten Schalltrichtern versehenen Blechinstrumenten, wie Hörner, Trompeten, Posaunen eigenthümlich ist, während er konisch verlaufenden Blech-

---

[1]) Ventil- und Cylindermaschine nebst den Stimmzügen werden vorgezeigt und erklärt.

instrumenten, wie Cornetten, Flügelhörnern, Euphoniums, Tuben, Bombardons fehlt.

Nach dem bisher Vorgetragenen bedarf es wohl keiner weiteren Ausführung: dass die intermittirenden Schwingungen der Lippen, durch welche die Blechinstrumente zum Tönen gebracht werden, in gleicher Weise erfolgen, wie jene der Oboë- oder Fagottanblaseröhrchen, weiters: dass, um diese durch Muskelspannung geregelten Schwingungen über bestimmte Grenzen hinaus zu beschleunigen oder zu verlangsamen, die Lippenspalte verkürzt oder verlängert werden muss, was durch engere oder weitere Mundstücke erreicht wird.

Selbstverständlich ist ferner, dass die Blechinstrumente, wiewohl ihre Obertöne der natürlichen Zahlenreihe folgen, gleichwie Oboë und Fagott zu den theilweise gedeckten zu zählen sind, ihre Rohrlängen mithin sowohl aus diesem Grunde, als auch wegen der über ihr Ende — wie bei allen auf die tönende Luftsäule basirten Instrumenten — hinausreichenden stehenden Schwingungen, reducirte sein müssen; auch, dass für alle mit kesselförmigen Mundstücken angeblasenen Blechinstrumente, mögen sie für welche Tonhöhen immer hergestellt sein, die gleichen Schwingungsgesetze gelten, und dass Blechinstrumente im Allgemeinen, je tiefer sie reichen sollen, um so weitere Mensuren erhalten müssen, — alle diese Sätze bedürfen, wie gesagt, einer weiteren Begründung oder Erläuterung ebenso wenig, als es einer Erinnerung bedarf, dass die chromatische Tonfolge der Zug-Posaunen in der Verlängerung des Tonrohres mittels des Zuges beruht, wodurch die Grundtöne und mit ihnen ihre Obertöne um sechs Halbstufen vertieft werden können. Auch die Posaunen, deren Züge ebenfalls durch Ventil- oder Cylindermaschinen ersetzt werden können, reichen wegen ihres engen Baues nur bis zum zweiten Partialton in die Tiefe. Die sogenannten Pedaltöne, nämlich die drei diesem Grenztone abwärts folgenden Halbtöne, bringt man schwer zuwege.

Noch dürfte vielleicht die Frage, wie sich die Blasinstrumente, hinsichtlich des Masses ihrer Schallstärke sowohl unter einander, wie gegenüber jener des Orgeltones verhalten, von Interesse sein, um zum Schlusse unserer Betrachtung der tönenden Luftsäule gestreift zu werden.

In ersterer Beziehung haben Material und die Art der Tonerregung einen bedeutenden Einfluss auf die Schallkraft. So werden

in gleicher Lage, beziehungsweise Tonhöhe, Flöten von Clarinetten, letztere wieder von Oboën übertönt. In dem Verhältnisse, als hier die Schallkraft mit dem Fortschreiten von der Luftzunge zum einfachen oder doppelten Rohrblatt zunimmt, wächst sie beim Uebergange vom Holz zum Blech noch mehr.

Ebenso bedeutenden Einfluss auf die relative Schallstärke übt die Zerlegung der Luftsäule in Partialtöne. Je höher diese reichen, umsomehr stehen ihnen grundtönige Säulen an Schallkraft nach.

Unter den Blechinstrumenten werden daher bei gleicher Tonhöhe lange und eng mensurirte über kürzere und weitgebaute den Sieg davontragen.

Dass einzelne Blasinstrumente erfahrungsgemäss selbst einer grossen Orgel gegenüber sich geltend machen können, beruht, abgesehen von ihrer hervorstechenden Klangfarbe, wesentlich auch auf dem Umstande, dass die Hervorrufung des Tones von Blasinstrumenten eine bedeutendere, zumal bei Ueberblasungen eine viel stärkere Luftpressung erheischt, wodurch auch die Intensität (Amplitude) der Schwingungen eine weit grössere werden muss, als die der zumeist grundtönig intonirten Orgelpfeifen. Während nämlich letztere mit einem Winde zum Tönen gebracht werden, dessen Dichtigkeit einer Wassersäule von 60—80, höchstens 100 Mm. das Gleichgewicht hält, beträgt die Pressung der Luft, die zur Hervorrufung eines Trompeten- oder Posaunentones erfordert wird, das acht- bis zehnfache. Auch um eine Oboë- oder Clarinettröhre in Schwingung zu versetzen, reicht selbst der dichteste Orgelwind nicht aus.

Der Grund liegt, wie schon gesagt, darin, dass die Orgelpfeife fast durchgehends für den Grundton intonirt wird, die Luftsäule also ihre Schwingungen in der einfachsten, mithin am leichtesten entstehenden Form zu vollführen hat, während die Töne der Blasinstrumente oft in der zweiten und dritten, die der Blechinstrumente sogar vorzugsweise in der dritten und gar vierten Octave liegen, zu deren Erzeugung sich die Luftsäule in viele gleichschwingende Theile (Naturhorn und Trompete selbst bis zu 16) zerlegen muss, was sich selbstverständlich nur durch einen zunehmend und — gegenüber der Orgelpfeife — überwiegend grösseren Luftdruck ermöglichen lässt. —

Dass Bläser auch in hohen Lagen die Töne trotz der zu ihrer Hervorbringung erforderlichen grösseren Windpressung leise

ansetzen und aushalten können, beruht einerseits in der eigenthümlichen Richtung, die, wie bei Flöten, dem Anblasestrome gegeben wird, andererseits in der grösseren Spannung der vibrirenden oder der drückenden Lippen, wie solches beim Intoniren von Blech- und Rohrblatt-Instrumenten der Fall ist. —

Indem wir hiermit unsere Betrachtungen der tönenden Luftsäule und der auf ihr beruhenden Tonwerkzeuge zu Ende geführt haben, wollen wir noch eine Frage berühren, die sich Ihnen sicherlich bereits aufgedrängt hat, als wir den vergeblichen Versuch machten, mittels des stärksten gebräuchlichen Orgelwindes der Clarinette einen Ton abzugewinnen, die Frage nämlich: welchen Intensitätsgrad des Anblasestromes die verschiedenen Blasinstrumente erheischen? Die Antwort hierauf sollen uns einige manometrische Versuche ertheilen, die wir zum Schlusse vornehmen wollen.

Ausser den, den einzelnen Instrumenten zukommenden, grosse Verschiedenheiten aufweisenden numerischen Intensitäten lassen diesbezügliche Versuche erkennen, dass zur Intonation aller gebräuchlichen Blasinstrumente die tiefen Töne die geringere, die hohen die grössere Windstärke erheischen, ausgenommen die Clarinette, bei welcher die umgekehrten Verhältnisse obwalten, was sich aus dem Umstande erklärt, dass das »Blatt« für tiefe Töne mit der Lippe kürzer, für hohe Töne länger abgegrenzt werden muss, demnach im ersten Falle schwerer in Schwingung geräth, mithin hierzu eine grössere Verdichtung des Windes benöthigt. Für die Grundtöne muss aber das Blatt kurz genommen werden, weil anderen Falles seine Schwingungen sofort in partielle übergehen würden, bei deren Schnelligkeit Töne von langsamen Schwingungen nicht zu Stande kommen können.

Auch die bei den Grundtönen unmittelbar hinter dem Blatte befindliche Lage des Schwingungsknotens erschwert die Vibration des Blattes, welches von diesem offenbar ungünstigsten Punkte aus, wo der stärkste Wechsel von Verdichtung und Verdünnung stattfindet, die Bewegung der Luftsäule ihrer vollen Länge nach einleiten muss. Bei den Ueberblasungen werden die Wellen kürzer, daher die Widerstände geringer, und es kann das Blatt, begünstigt durch seine grössere Länge, auch bei vermindertem Winddrucke in Theilschwingungen gerathen.

Wir wollen jetzt einige solche Versuche anstellen, wobei wir uns des in Figur 202 dargestellten, aus zwei communicirenden Glasröhren bestehenden Manometers bedienen, von welchen Röhren die längere 120 und die kürzere, an ihrem Ende im Winkel gebogene, 60 Centimeter misst, und welch' letztere man ihrer Länge nach mit einem Millimetermassstabe versieht. Das umgebogene Ende verbindet man mit einem leichten Kautschukschlauch. Als Mundstück für den Bläser dient ein am Ende etwas aufgebauchtes Glasröhrchen, das in das Ende des Schlauches eingeführt wird.



Fig. 202.

Die Versuche liefern bei mittlerer Tonstärke folgende manometrische Ergebnisse:

	Manometerstand in Millimetern bei tiefen Tönen	Manometerstand in Millimetern bei hohen Tönen
Flöte	50	250
Oboë	240	450
Clarinett	400	208
Fagott	320	640
Horn	130	710
Trompete	320	840
Posaune	80—100	950—1050

Es versteht sich von selbst, dass diese Zahlen nur approximative sein können, da schon der Begriff: »mittlere Stärke« ein dehnbarer ist, und ausserdem noch weitere Factoren in Betracht kommen, wie: Stärke der Blätter und Röhrchen, dann Mensurunterschiede.

32. Vortrag.

(Stäbe. Allgemeines. — Intervallfolge der Obertöne.)

Mit der Betrachtung des Verhaltens der tönenden Luftsäule in allen zur Musikausübung dienenden Instrumenten sind wir letzthin zu Ende gelangt. Damit, sowie mit den tönenden Körpern, die wir vordem schon kennen lernten, also: mit der menschlichen Stimme, der Saite und der Luftsäule, ist der Kreis der wichtigsten, sozusagen »tonangebenden« Factoren der ausübenden Musik als abgeschlossen anzusehen.

Was an klangerzeugenden Materien oder Formen zu betrachten noch erübrigt, spielt in dieser Beziehung gegenüber den vorgenannten, eigentlichen Trägern des musikalischen Gedankens eine verhältnissmässig mehr oder weniger untergeordnete Rolle, mögen diese Tonquellen in physikalisch-akustischer Hinsicht ein noch so hohes Interesse bieten, wie dies hinsichtlich der Stäbe, mit denen wir uns zunächst befassen wollen, sowie bezüglich der hierauf zu betrachtenden Platten und Membranen thatsächlich der Fall ist.

Wenn wir von Stäben als tönenden Körpern sprechen, so befinden wir uns eigentlich noch auf dem zuletzt begangenen Gebiete der Zunge, denn diese ist im Grunde nichts anderes, als ein einseitig befestigter Stab. Dennoch besteht zwischen Stab und Zunge ein wesentlicher Unterschied, welcher die abgesonderte Behandlung der Stäbe rechtfertigt und der darin beruht, dass die Schwingungen der Zunge durch Luft (mitunter auch unter Mitwirkung eines Stosses, wie bei der »Percussion« im Harmonium) eingeleitet und unterhalten werden, während bei den Stäben im engeren Sinne dies lediglich durch Reibung, Zerrung, Stoss oder elektro-magnetische Anziehung bewirkt wird.

Haben wir es mit einer Materie zu thun, deren moleculäre Beschaffenheit ihr selbst bei weitest getriebenem Vorwiegen einer Dimension ein bestimmtes Mass von immanenter elastischer Steifigkeit sichert, wie solches bei fadenförmigen, metallischen Körpern der Fall ist, so können wir sie uns unter allen Verhältnissen einmal in einem Zustande, in welchem dieselben nur durch Spannung zum Vollführen tönender Schwingungen geeignet werden, dann aber auch

wieder in einem solchen Zustande denken, in welchem ihre innere Steifigkeit hinreicht, um ohne Spannung solcher Schwingungen fähig zu sein.

Ein aus Stahl, Eisen, Messing oder anderen widerstandsfähigen (elastischen) Metallen oder Legirungen erzeugter Draht von bestimmtem Durchmesser wird, sobald er eine gewisse Länge erreicht hat, der Spannung bedürfen, um in tönende Schwingungen versetzt werden zu können; er ist zur Saite geworden.

Dagegen wird ein kurzes Fragment desselben Drahtes ohne Spannung, und zwar vermöge seiner eigenen Rigidität durch Schlagen, Streichen oder Reissen zum Tönen gebracht werden können; der Draht ist zum Stabe geworden.

Es kommt somit unter allen Umständen immer nur auf das relative Verhältniss zwischen Länge und Dicke an, ob die Saite in den Stab oder der Stab in die Saite übergeht. Ein hinlänglich kurzes Stück einer noch so dünnen Saite kann als Stab akustisch functioniren, wogegen ein noch so dicker Stab bei zunehmender Länge endlich der Spannung bedürfen wird, um tönende Schwingungen vollführen zu können. —

Hiernach nun möchte der Schluss gestattet erscheinen, dass zwischen der Schwingungsart einer Saite und eines Stabes eine Analogie bestehe.

Diese besteht nun allerdings in mehr als einer Beziehung, so lange wir es mit geradelinigen Stäben zu thun haben.

Die Analogie besteht zunächst darin, dass der Stab, gleich der Saite, sowohl transversale, longitudinale, als drehende Schwingungen ausführen und sich, gleich ihr, in schwingende Theile zerlegen kann.

Während aber die Saite nur dann tönende Schwingungen zu vollführen vermag, wenn sie zwischen zwei festen Punkten hinlänglich ausgespannt wird, lässt der Stab, da er einer Spannung nicht bedarf, verschiedene Befestigungsarten zu, deren jede von anderen Schwingungserscheinungen begleitet ist. —

Wir können den Stab an seinen beiden Enden befestigen, oder dieses nur mit einem Ende thun und das andere frei lassen; wir brauchen ihn endlich auch gar nicht zu befestigen, sondern ihn blos auf einer passenden Unterlage ruhen zu lassen und in dieser Lage in Schwingung zu versetzen. Auch können diese Befestigungsarten

in der Weise modificirt werden, dass man beide Enden, statt sie zu befestigen, nur leicht an zwei Widerlager anstemmt, oder dieses nur mit einem Ende bewirkt und das andere freilässt; oder endlich, dass man ein Ende befestigt und das andere anstemmt. Wir wollen uns aber mit diesen Modificationen, die blos geringfügige Abweichungen der Schwingungsformen wie der, den Partialschwingungen entsprechenden Tonhöhen gegenüber den vorangeführten Hauptbefestigungsarten aufweisen, nicht weiter befassen und uns nur auf die Untersuchung der, die beiden letzteren begleitenden Erscheinungen beschränken, weil diese Befestigungsarten, nämlich: an einem Ende befestigt oder an beiden Enden frei, die einzigen sind, bei welchen Stäbe zu musikalischen Zwecken dienen können.

Was das Material betrifft, so können Stäbe aus Metallen, aus Holz, aus Glas und aus natürlichem oder künstlichem Gestein (wie gebrannter Thon, Gyps), ebenso aus Harzen, Wachs, Stearin, Unschlitt u. dgl. bestehen, und es wird nun die Frage herantreten, welchen Einfluss die molekuläre Beschaffenheit der Stoffe, sowie das Verhältniss der Dimensionen auf die Tonhöhe üben.

Die gleiche Frage wird sich an die Form des Querschnittes knüpfen, da wir diesen quadratisch wie rechteckig, dreieckig wie spitzwinkelig, rund wie elliptisch gestalten können.

Wie man sich voller, kann man sich auch hohler Stäbe in Form von Röhren aus Metall oder Glas bedienen. Die letzteren werden sich vorzugsweise zweckmässig erweisen in Fällen, wo man die im Innern des Rohres stattfindenden Vorgänge beobachten und dieselben durch Sand, Staub oder Flüssigkeiten sichtbar machen will; während für die Veranschaulichung solcher Vorgänge an der Aussenseite, wenn sie eine Fläche bildet: Sand, oder wenn sie rund ist: Reiter aus Papier, Kork oder Draht dienen.

Wenn wir nun darangehen, die Stäbe zunächst in transversale Schwingungen zu versetzen, wozu wir uns des hölzernen Hammers und noch zweckmässiger des Bogens oder der Streichstäbchen bedienen, ja in manchen Fällen auch die bewegende Kraft des Elektromagnetismus heranziehen können, so werden wir die Erfahrung machen, dass ein Stab um so leichter in transversale Schwingungen geräth, je weiter sich seine Dimensionen wie seine Befestigungsart von jenen der Saiten entfernen.

So wird ein verhältnissmässig kurzer und dicker Stab, dessen beide Enden befestigt sind, schwer oder gar nicht zum Tönen zu bringen sein, während dies leicht gelingt, wenn die beiden Enden des Stabes frei sind. Umgekehrt wird ein dünner, biegsamer Stab, je länger er ist, umsoweniger geeignet sein zu schwingen, wenn er an beiden Enden frei ist, wogegen er leichter in Schwingung geräth, wenn er an einem, und noch leichter, wenn er an beiden Enden starr befestigt ist. Weiters werden wir bei unseren Versuchen gewahr werden, dass die Schwingungsformen der

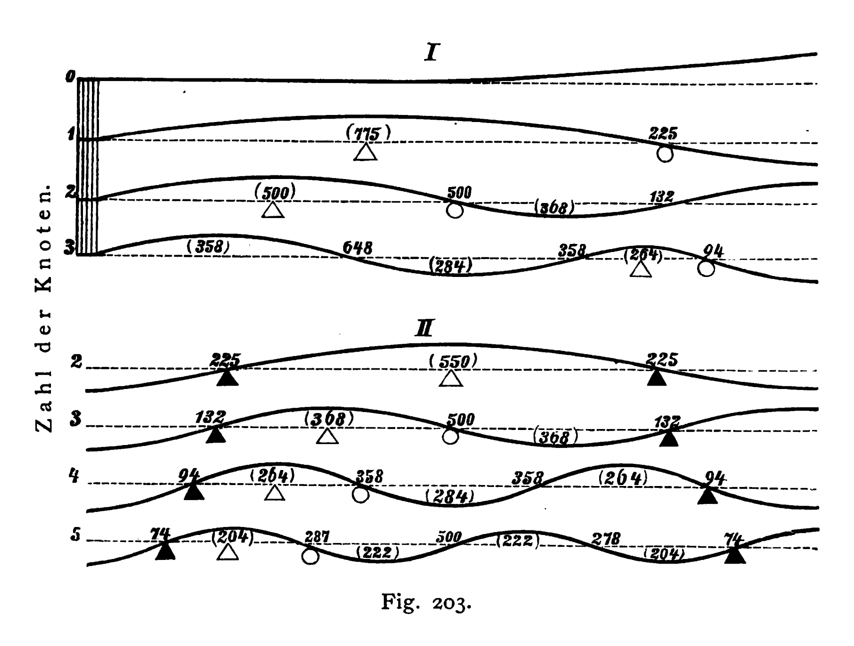


Fig. 203.

Stäbe zwar mit jenen der Saite übereinstimmen, weil sich der Stab bei Obertönen gleich ihr in durch Knotenstellen getrennte Abtheilungen zerlegt, deren Aufeinanderfolge jener der natürlichen Zahlen entspricht. Die Abtheilungen selbst aber bilden nicht Strecken von übereinstimmender Länge, wie bei den Saiten, sondern sind ungleich lang, liegen jedoch symmetrisch nach der Mitte des Stabes. Die äussersten sind die kürzesten; je grösser die Zahl der schwingenden Theile ist, umsomehr stimmen ihre Längen überein. Der Grund dieser Ungleichheit beruht wesentlich darin, dass bei den als vollkommen biegsam anzusehenden Saiten nur die Spannung es ist,

die der Schwingung Widerstand entgegensetzt, während beim Stabe der Widerstand in der Starrheit des Materials beruht.

Die Tabelle (Fig. 203) zeigt die Lage der Knoten und die Längen der Bäuche bis zum vierten Partialtone eines nach beiden hier in Betracht kommenden Arten befestigten Stabes von gleicher Länge.

Zur Erklärung der Tabelle selbst diene, dass die Knotenabstände[1]), vom Ende gegen die Mitte gezählt, mit nicht eingeklammerten, die Streckenlängen dagegen mit eingeklammerten Zahlen bezeichnet sind. Von den Zeichen bedeutet ○ Dämpfung, △ Bogenstrich, ▲ Unterlage. Die Länge des Stabes ist mit 1000 Millimeter angenommen.

Wie aus diesen Darstellungen zu ersehen ist, hat ein einseitig befestigter Stab (I) am freien Ende einen halben Bauch. Die Abtheilungen folgen, wie die ungeraden Zahlen, gleich der Luftsäule einer gedeckten Röhre.

Ein an beiden Enden freier Stab (II) hat an beiden Enden halbe Bäuche. Die Abtheilungen folgen dem Gesetze der natürlichen Zahlenreihe, gleichwie die Luftsäule einer beiderseits offenen Röhre, jedoch erst vom zweiten Partialtone ab, da der Transversalgrundton eines beiderseits freien Stabes nur zu Stande kommt, wenn dieser in Abständen von $^1/_4$ (genau von 0·22416) seiner Länge von jedem Ende auf Unterlagen ruht, mithin zwei Schwingungsknoten sich bilden können, während der Grundton der Luftsäule einer beiderseits offenen Röhre bekanntlich einen Knoten heischt, der aus bereits früher erörterten Gründen etwas über der Mitte der Röhre sich befindet.

Bei beiden Befestigungsarten bleiben die betreffenden Lagen der Knoten und die relativen Längen der Bäuche dieselben, mag der Stab aus welchem Materiale immer bestehen, mag er kurz oder lang, rund oder kantig, voll oder hohl sein. Von Einfluss sind

[1]) Strehlke gibt für die Abstände der Schwingungsknoten von den Enden eines freischwingenden Stabes von 1000 Millimetern Länge folgende genaue Zahlen an:

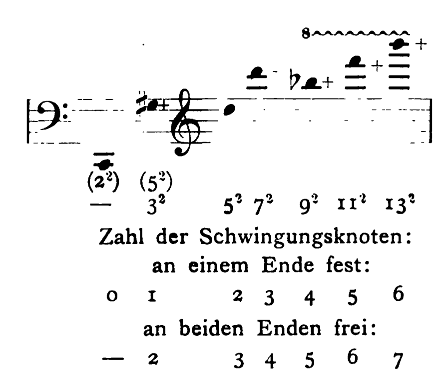
für den ersten (Grund-) Ton (mit 2 Knoten) 224·16 Mm.
» » zweiten » (» 3 ») 132·11 und 500 Mm.
» » dritten » (» 4 ») 94·44 und 358·45 Mm.
» » vierten » (» 5 ») 73·45, 278·75 und 500 Mm.

alle diese Umstände einzig nur auf die **absolute** Tonhöhe, d. h. auf die Schwingungszahl.

Bezüglich letzterer nun verhalten sich die Intervalle der aufeinanderfolgenden Obertöne beiderseits freier Stäbe wie die Quadrate der ungeraden Zahlen 3, 5, 7 u. s. w.

Bei einseitig befestigten Stäben folgen die Intervalle erst vom zweiten Obertone ab diesem Gesetze, während die beiden ersten Töne sich wie die Quadrate von 2 und 5 verhalten. Es folgt daraus, dass Stäbe bei keiner wie immer gearteten Befestigungsweise harmonische Obertöne geben.

Dieses Verhältniss stellt in Notenschrift und Schwingungszahlen das folgende Beispiel dar, wobei *c* als Grundton angenommen ist.



Die harmonischen Obertöne (Octave, seltener Duodecime), welche man vernimmt, wenn man einen, mit grosser Amplitude schwingenden Stab (oder eine Stimmgabel) in unmittelbarster Nähe behorcht, sind nicht Partialtöne des schwingenden Körpers selbst, da sie sich weder durch Sand noch durch Reiter nachweisen lassen, sondern directe Folge der durch die Schwingung des Körpers (Stab, Gabel) hervorgerufenen Lufterregung, weshalb sie auch als »Lufttöne« bezeichnet werden. Die Erklärung der Erscheinung ist folgende. Der schwingende Stab (Fig. 204), wenn er sich aus seiner Ruhelage *a* nach *b* bewegt, treibt die auf seinem Wege befindlichen Lufttheilchen vor sich her, verdichtet sie somit; zugleich lässt er auf der von ihm durchmessenen Strecke *a*—*b* eine Verdünnung hinter sich, also einen relativ leeren Raum, in welchen sich die dichter gestellten Lufttheilchen stürzen und demzufolge bei *a* einen Luftstoss bewirken, der

genau dieselbe Wirkung hat, als der durch die Schwingungsbewegung nach *a* erzeugte Verdichtungsstoss. Nun schwingt der Stab nach *c* und es wiederholt sich derselbe Verdichtungs- und Verdünnungsvorgang. Die bei *c* verdichteten Lufttheile strömen in gleicher Weise wie früher von *b* nach *c* und erzeugen auch hier den Luftstoss. Das Ohr wird demnach während eines Hin- und Herganges des Stabes von vier Luftstössen getroffen, von welchen jeder erste und dritte von der directen Verdichtungswirkung des vibrirenden Stabes, der zweite und vierte aber von dem Ausgleiche zwischen den verdichteten und verdünnten, in der Schwingungsebene des Stabes befindlichen Lufttheilchen herrührt, wie dies die Pfeilrichtungen der Figur 205 andeuten.

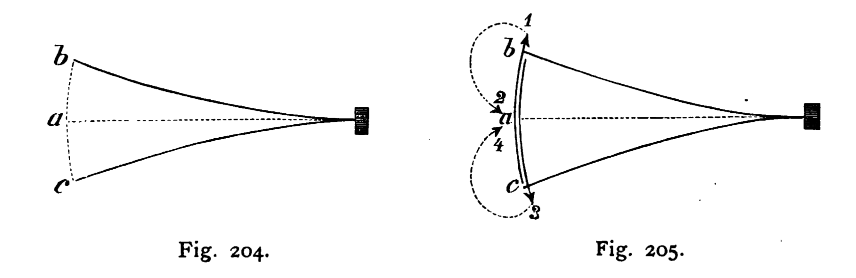


Fig. 204. Fig. 205.

Hält man ein, an einem Ende plattgedrücktes und nur eine schmale Spalte übrig lassendes Röhrchen, das man mittels eines Kautschukschlauches mit dem Ohre verbindet, im rechten Winkel zur Schwingungsebene des Stabendes diesem möglichst nahe, so wird man, befindet sich die Spalte parallel der Ruhelinie *a*—*a*, die Octave, bei *b* oder *c* aber nur den Grundton hören. Bewegt man die Spalte zwischen *b* und *c*, so hört man abwechselnd Grundton und Octave.

Man benützt zu diesem Versuche am besten einen Metallstab von beiläufig 3—4 Millimeter Dicke, 5—6 Millimeter Breite und 40 Centimeter Länge, den man in den, von Strehlke für den Grundton angegebenen Knotenpunkten mit kleinen konischen Oeffnungen versieht, mittels derselben auf zwei, in einem Brette befestigte Stahlspitzen (Fig. 206) steckt und in der Mitte mit dem Bogen kräftig streicht; oder man befestigt den Stab an den Knotenpunkten zwischen zwei um ihn geschlungenen, straff gespannten

Darmsaiten (Fig. 207). Der in Figur 38 beschriebene, elektromagnetisch bewegte Stab eignet sich, in Folge der Continuität seiner Schwingungen, für diesen Versuch ganz besonders. Auch an einer, mit dem Stiele in einem Schraubstocke fest eingespannten, grösseren Stimmgabel kann man die gleichen Beobachtungen machen.

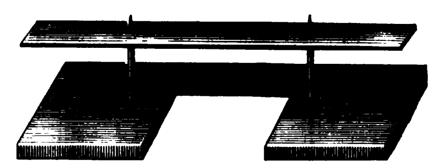


Fig. 206.

Elektrisch bewegte Stimmgabeln, wenn sie nicht zu massiv sind, lassen diese Lufttöne sogar aus einiger Entfernung ziemlich deutlich vernehmen, zumal, wenn man Resonatoren anwendet. —

Wir werden auf diese Lufttöne, auf welche W. Preyer eine von der Helmholtz'schen Theorie der Summationstöne abweichende Erklärung ihres Entstehens stützt, bei dem Capitel der Combinationstöne zurückkommen.

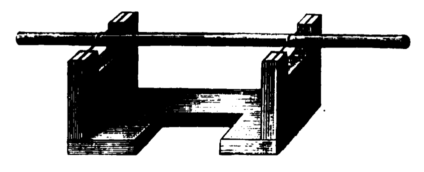


Fig. 207.

Nehmen wir unser, die Transversalschwingung der Stäbe behandelndes Thema wieder auf.

Dass die Knoten sich thatsächlich an den auf unserer Tabelle bezeichneten Punkten bilden, soll jetzt durch einige Versuche gezeigt werden, die wir mit einseitig befestigten und mit freien Stäben vornehmen wollen, welche sowohl für das Auge, wie für das Ohr die Aufeinanderfolge der Theilschwingungen nach Tonhöhe, und der denselben entsprechenden Zahl von Knotenlinien, beziehungsweise schwingenden Abtheilungen darstellen werden.

Beginnen wir mit einer sehr elastischen, dünnen Stahlschiene von 50 Centimeter Länge, die wir in einen Schraubstock vertical

einspannen (Fig. 208), am oberen Ende und etwas unter der Mitte mit kleinen Gewichten *a a* beschweren und auf einer Entfernung von 112 Millimetern vom oberen Ende mit einer glänzenden Glasperle (*b*) versehen. Führen wir gegen das untere Gewicht einen seitlichen Stoss, so wird das obere Gewicht in entgegengesetzter Richtung hin- und herpendeln, die Perle aber unbewegt bleiben, was beweist, dass sich hier der Knotenpunkt befindet. Bringen wir die Gewichte und Perle (beide um eines vermehrt) an den in Figur 209

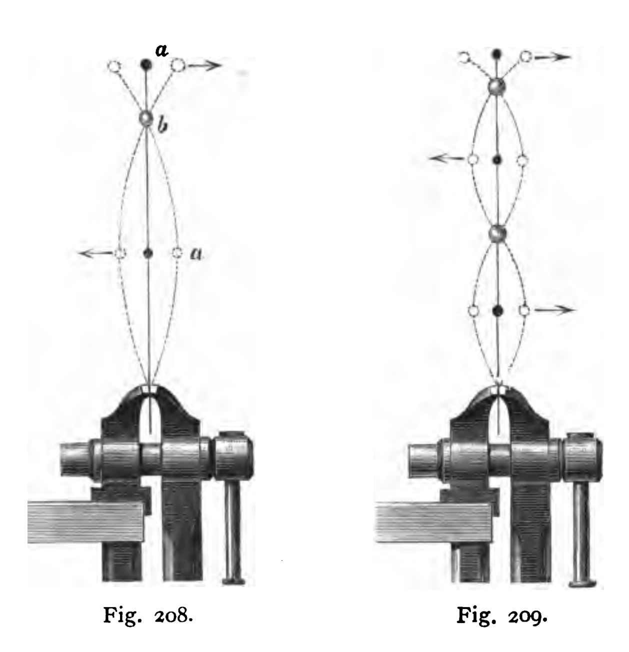


Fig. 208. Fig. 209.

angedeuteten Stellen an, so werden sich auf der Schiene drei schwingende Abtheilungen und zwei Knotenpunkte bilden.

Dieses Experiment galt blos dem Auge, mit welchem Sie, wenn wir die Schiene zwischen eine grelle Lichtquelle und einen weissen Schirm stellen, die auf letzterem als Schattenbilder erscheinenden Schwingungen verfolgen können.

Spannen wir nun in unseren Schraubstock ein minder nachgiebiges Lineal derart ein, dass seine Fläche horizontal liegt (Fig. 210). Seine Bewegungen — man ruft sie am zweckmässigsten mittels Bogenstriches hervor — erfolgen so rasch, dass wir ihnen mit dem

Auge nicht zählend folgen können, selbst wenn es seiner vollen Länge[1]) nach schwingt, in welchem Falle seine Schwingungszahl einem Sub-sub contra $G_3 = 24$ Schwingungen (eines allerdings unter der Wahrnehmungsgrenze liegenden Tones) entspricht.[2])

Die nächsten Theiltöne folgen einander in der im nachstehenden Beispiele (Fig. 211) dargestellten Weise, und es bilden sich mit der Zunahme der Knotenzahl immer kleinere schwingende Abtheilungen.

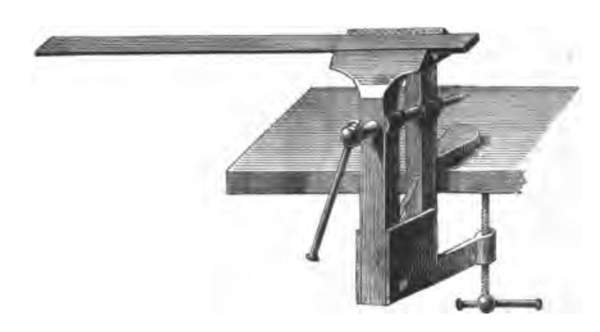


Fig. 210.

Streut man Sand auf das Lineal, so sammelt er sich, Querstreifen bildend, an den Knotenstellen, deren Lage er damit anzeigt. Für Dämpfung und Bogenstrich gelten die früheren Zeichen.

Experimentiren wir jetzt mit diesem, an beiden Enden freien, runden Messingstab und hierauf mit diesem Glasstreifen.[3]) Auf letzterem können wir die Knotenlinien ebenfalls durch aufgestreuten Sand sichtbar machen; am Rundstabe geht dies erklärlicher Weise nicht und wir müssen zu einem anderen Mittel greifen. Es sind

---

[1]) Die Maasse des Lineals sind (in Millimetern): Länge 474, Breite 30, Dicke 3, die Länge des im Schraubstocke eingespannten Theiles 35. — Tonfolgen und Abstände der Knoten vom freien Ende gemessen: G_3 0; Es_0 103; A^0 232; a^1+ 295; f^2+ 335; cis^3+ 360; fis^3— 375.

[2]) Diese Schwingungszahl ist durch Rückschluss theoretisch ermittelt; die experimentelle Bestätigung lässt sich mittels elektro-magnetischer Anziehung und des phonischen Rades (siehe Anhang) leicht bewerkstelligen.

[3]) Hier die Maasse und Töne derselben:

Messingstab: (Länge 605, π 21 Mm.) As_1 150, d^0 85, d^1— 58, b^1+ 46, f^2+ 35, h+ 30, e^3— 27, gis^3+ 24, c^4+ 21;

Glasstreifen: (Länge 510, Breite 43, Dicke 3 Mm.) D_0 100, as^0 70, as^1— 48, c^1+ 38, h^2+ 31, f^3+ 25, b^3— 21, d^4+ 19, fis^4+ 18. — Alle Knotenabstände in Millimetern.

dies sogenannte Drahtreiter, kleine, schenkelförmig gebogene, dünne Drahtstückchen, deren Enden des Gleichgewichtes wegen mit

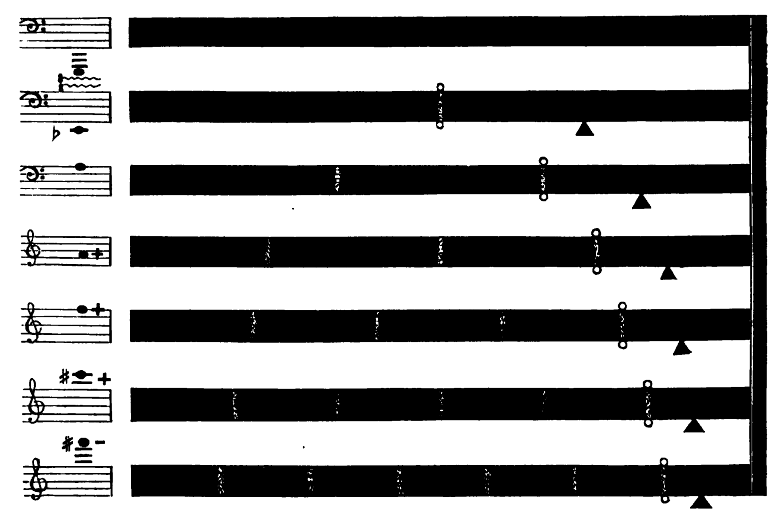


Fig. 211.

kleinen Siegelwachströpfchen beschwert werden. Diese Reiterchen, auf dem Stabe balancirend (Fig. 212), begeben sich, sobald letzterer

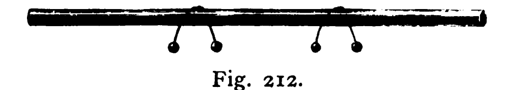


Fig. 212.

zu tönen beginnt, zu den Knotenpunkten, wo sie dann ruhig verweilen. Zur Befestigung der freien Stäbe bedient man sich zweck-

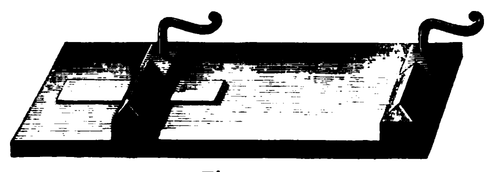


Fig. 213.

ässig der in Figur 213 dargestellten Vorrichtung. Von den beiden, in keilförmigen Korken endigenden Holzklötzchen ist das linke verschiebbar. Ueber den Korkkanten befindet sich je ein unten zu-

geschärfter, mit weichem Leder überkleideter, sogenannter Reiber, der mittels seines Gewindes höher oder tiefer gestellt werden kann, um parallel mit der Korkschneide den Stab auf seine Unterlage fest zu drücken und dadurch unbeweglich zu machen. Die Verschiebbarkeit der einen Unterlage ist nothwendig, um die Distanzen der Auflagen den Abständen der Knoten von den Enden des Stabes anzupassen.

33. Vortrag.

(Stäbe. Tonhöhe.)

Wurden die Intervallverhältnisse der aufeinanderfolgenden Obertöne der von uns untersuchten, dem Stoffe, den Dimensionen, wie den Befestigungsarten nach verschiedenen Stäbe ziemlich übereinstimmend gefunden, so ist dies in Betreff der Tonhöhe durchaus nicht der Fall, denn diese hängt sowohl von der molecularen Beschaffenheit des Stoffes, seiner specifischen Schwere und Elasticität, bei sonst gleichen Verhältnissen von Länge und Querschnitt, bei einem und demselben Stoffe aber von der jeweiligen Länge und Querschnittsform ab.

Je dichter der Stoff, und je grösser dessen Elasticität ist, um so höher sind die Töne des Stabes. Ebenso wächst die Tonhöhe mit der Dicke. Runde oder rechteckige Stäbe verhalten sich diesbezüglich wie deren Durchmesser. Stäbe von doppeltem Durchmesser geben die Octave; vom dreifachen die Duodecime u. s. w. Die Breite rechteckiger Stäbe hat keinen Einfluss auf die Tonhöhe. Solche Stäbe geben höhere Töne, wenn sie zur Ebene ihrer schmalen Seite, als wenn sie zu jener ihrer Breite schwingen. Röhren geben höhere Transversaltöne, als volle Stäbe von gleichem Stoffe und Querschnitte.

Beim Verkürzen der Stäbe werden die Töne höher und es wachsen die Schwingungszahlen im umgekehrten Verhältnisse zu den Quadraten der Längen. Ein um die Hälfte verkürzter Stab wird demnach viermal, ein Stab von ein Drittel Länge wird neunmal und

einer, der viermal so kurz ist, sechzehnmal schneller schwingen. Wird also ein Stab, dessen Schwingungen man zählen kann, so weit verkürzt, dass er einen Grundton von bestimmbarer Höhe gibt, so lässt sich die Schwingungszahl dieses Tones aus dem zum Quadrate erhobenen Verhältnisse der beiden Längen mit einer für gewöhnliche Zwecke hinreichenden Genauigkeit berechnen, zumal bei nur einseitiger Befestigung, wenn der Stab dünn und biegsam ist. Für subtile Messungen eignet sich diese Methode minder, denn selbst bei Erfüllung der theoretischen Bedingung einer durchaus gleichen Beschaffenheit der Materie und der Dimensionen des Stabes kann die, durch ein noch so festes Einspannen abgegrenzte Länge nicht als diejenige angesehen werden, bis zu welcher die Schwingungen des Stabes nur reichen, weil auch die eingeklemmten Partien an den Schwingungen theilnehmen, die wahre Länge des schwingenden Theiles sich mithin nicht zuverlässlich ermitteln lässt.

Lassen Sie uns jetzt dieses interessante Experiment durchführen. Spannen wir diese gleichartig abgerichtete Stahlschiene von 2 Millimetern Dicke, 12 Millimetern Breite, auf eine Länge von 752 Millimetern in wagrechter Lage in den Schraubstock und zwar in der Art fest, dass die Breitseite von den Backen gefasst wird, so werden wir finden, dass jede vierte einfache Schwingung dieses unseres Stabes, mit einem Pendel-, beziehungsweise Glockenschlage unseres elektrischen Regulators zusammenfällt, unser Stab somit vier Schwingungen in der Secunde vollführt.

Nach dem zuvor erwähnten Gesetze wird ein doppelt so langer Stab, in unserem Falle also von 1504 Millimeter, zu einer jeden Schwingung eine Secunde brauchen. — Selbstverständlich können wir die Schwingungen unseres Stabes (vier in der Secunde) bequem zählen; um aber eine Tonempfindung hervorzurufen, müsste er mindestens achtmal schneller schwingen. Wir wollen nun einige Töne suchen, deren Schwingungszahl wir zu bestimmen wünschen. Je mehr wir den Stab verkürzen, um so höhere Töne wird der verkürzte Theil geben, den wir durch Zerrung, Schlag oder Bogenstrich in Schwingung versetzen können. Wir haben uns jetzt für drei Töne entschieden und finden, dass die diesen Tönen zukommenden, zwischen dem Schraubstocke und dem freien Ende schwingenden Stücke unseres Stabes 133, 108 und 94 Millimeter messen, in welchen Fällen also:

$$\frac{L\,1504}{l\,133} = 11{\cdot}3^2 = 127{\cdot}7^{\,n} = c_0$$

$$\frac{L\,1504}{l\,108} = 13{\cdot}9^2 = 192^{\,n+} = g_0$$

$$\frac{L\,1504}{l\,94} = 16^2 = 256^{\,n} = c^0.$$

Dividiren wir nun z. B. durch die Länge des Stückes $l = 94$ die Länge des, Secundenschwingungen vollführenden Stabes $L = 1504$, und erheben wir das gefundene Product (16) auf das Quadrat, so wird die Schwingungszahl (n) unseres abgegrenzten Stückes (l) 256, somit der Tonhöhe nach ein c^0 sein, wie diess unser Sonometer auch bestätigt.

Transversalschwingende gerade Stäbe finden in der Musik, wie schon erwähnt, blos bei einseitiger Befestigung und zwar als Zunge eine künstlerische, sonst aber heute eine nur nebensächliche Verwendung.

Als Zunge bilden sie den Hauptbestandtheil der grossen und wichtigen Familie der Zungeninstrumente (Rohrwerke in den Orgeln, Harmoniums und verwandten Blasinstrumenten). — Ausserdem beruhen auf dieser Befestigungsweise die sogenannten Spielwerke, wie sie in Uhren und Dosen vorkommen, bestehend aus abgestimmten Stahlzähnen, welche durch, in eine drehbare Walze eingeschlagene Stifte geschnellt werden. Hierher zählt auch die früher gebräuchliche Eisenvioline (Stahlgeige, Nagelharmonika, Fig. 214), bestehend aus Eisenstiften, von, der durch zwei Octaven chromatisch reichenden Tonleiter entsprechend abnehmender Dicke und Länge. Dieselben sind an einen Resonanzkasten befestigt. Durch Streichen mit dem Bogen kann man denselben nebst dem Grundtone auch die nächsten, ungeraden Obertöne entlocken.

Die schon früher erwähnte Schwierigkeit, an beiden Enden befestigte Stäbe in Schwingungen zu versetzen, lässt solcher Art befestigte Stäbe weder zu musikalischen noch zu wissenschaftlichen Zwecken gut geeignet erscheinen und wir können sogleich zur Betrachtung der Verwendung beiderseits freischwingender Stäbe übergehen.

Eine Reihe von Glas- oder Metallstreifen von zunehmender Länge (auch Alabasterstäbe eignen sich hiezu), deren, ihrem Grundtone entsprechenden beiden Knotenstellen auf gespannten Bindfäden, auf weichen Kautschukröhren oder kantigen Korkunterlagen

ruhen, ferner das auf gleicher Construction fussende Xylophon, in welchem Holzstäbe an Schnüren hängend, oder auf Strohcylinder gebettet (Fig. 215) an Stelle der Metall- oder Glasstreifen treten, sind Instrumente, die mehr in die Kategorie von Spielzeugen gehören, wiewohl in früheren Zeiten Virtuosen (besonders Gusikow) auf letzterem Instrumente mit Erfolg concertirten. Der Ton dieser Instrumente wird mittels hölzerner Hämmerchen hervorgebracht, die im ersteren Falle mit Filz oder Kork, im letzteren aber nicht überkleidet werden.

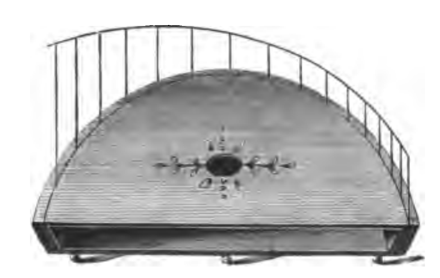


Fig. 214.



Fig. 215.

Künstlerische, weil charakteristische Verwendung, erfuhr das Xylophon meines Wissens nur im *Danse macabre* von St. Saëns. — Das ebenfalls hierher gehörige »Stahlclavier«, in welchem abgestimmte Stahlstäbe mittels eines durch Tasten bewegten Hammerwerkes zum Tönen gebracht werden, findet in Orchestern statt der früher gebräuchlichen »Glöckchenspiele« Verwendung; ich erinnere an die Zauberflöte.

Werden Stäbe oder Röhren mittels Bindfäden an einem mit Hörscheiben versehenen Tannenstabe aufgehängt (Fig. 216) und mittels eines weichen Hammers transversal tönen gemacht, und bringt man die Scheibe an das Ohr, so glaubt man ein förmliches Glockengeläute zu hören. An der Bildung dieses Klanges sind nebst den transversalen Obertönen vielleicht auch Längsschwingungen betheiligt, wie solches auch bei Saiten und zwar besonders bei diesen in Folge der bei jeder Ausbiegung statthabenden Dehnungen mit den darauffolgenden Zusammenziehungen beim Durchgange durch die Ruhelage, aber auch bei Zungen und Stimmgabeln der Fall sein dürfte. Dass solche Dehnungen bei grosser Schwingungsweite im ersten Augenblicke den Ton vertiefen, ist bekannt. Die Töne der hier mit-

wirkenden Längsschwingungen werden zwar nicht gehört, aber es ist, wie gesagt, nicht ausgeschlossen, dass sie zur Klangfarbe beitragen können.

Versuche, durch Reibung hervorgerufene Transversalschwingungen sowohl einseitig befestigter, wie in ihren Knotenpunkten festgehaltener freier Stäbe als tönendes Princip künstlerisch verwendbarer nstrumente zu verwerthen, wurden, besonders in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts, wiederholt gemacht und in mannigfacher Art ausgeführt, und sie verfehlten nicht zur Zeit ihres Erscheinens ein

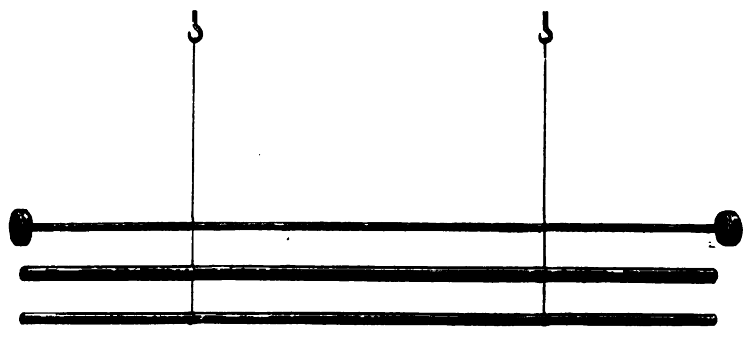


Fig. 216.

gewisses Aufsehen zu erregen, indem sie vermöge einiger, sonstigen Tasteninstrumenten mangelnder Vorzüge Erwartungen weckten, deren Nichterfüllung aber diese Exotica bald der Vergessenheit anheimfallen machte. Zu den bemerkenswerthesten dieser Instrumente gehören Chladny's »Euphon« und »Clavicylinder«, dann das von G. Buschmann, einem Posamentier, 1816 erfundene »Terpodium«.

Die den beiden erstgenannten Erfindungen zu Grunde liegende constructive Idee versinnlichen Ihnen die in den Figuren 217 und 218 abgebildeten kleinen schematischen Modelle. Ein an eine Stimmgabel *a* (Fig. 217)[1]) gekittetes, gläsernes Streichstäbchen, *b* mit dem befeuchteten Fingerwulste der Länge nach gerieben, wodurch die Gabel in Transversalschwingungen geräth und tönt: das ist das »Euphon«.

---

[1]) Chladny wendete bei seinen genannten Instrumenten verschiedenartig gekrümmte Eisenstäbe an, von welchen im 35. Vortrage noch weiter die Rede sein wird. Die Anwendung der Stimmgabel in den Modellen geschah des handsameren Formates wegen.

Durch geschickten Auf- und Abstrich kann man den Ton, gleichwie auf Streichinstrumenten, fortdauernd erhalten. Ersetzt man die Finger durch einen rotirenden Glascylinder *c* (Fig. 218), zwischen welchem und dem Streichstabe *b* ein nasser Tuchstreifen eingeschaltet wird, so haben wir die Function des »Clavicylinders« vor uns. Die Tasten *d*, mittels welcher das Instrument gespielt wird, haben lediglich den Zweck, den Streichstab mehr oder weniger stark an den Cylinder zu drücken, wodurch der Ton entsteht und dessen dynamische Abstufungen bewirkt werden. Der Tonfluss ist ein ununterbrochener, die Schallkraft grösser als beim Euphon, die Annehmlichkeit des Klanges aber geringer.

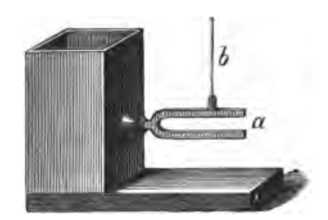


Fig. 217.

Der fatale Umstand, dass man beim Spiele dieser Instrumente fortwährend mit Feuchtigkeit zu hantiren hatte, dürfte zu ihrer baldigen Vergessenheit wohl auch beigetragen haben. Eine zweckmässigere, weil die Verwendung von Flüssigkeit vermeidende Variante, welche unser Modell darstellt, bestand darin, das Streichstäbchen *b* aus Holz herzustellen, die Walze *c* mit Leder zu überziehen und als Frictionsmittel Bogenharz anzuwenden. Mit der Taste ist der zwischen die Zinken der Gabel *a* einfallende Dämpfer *e* verbunden. —

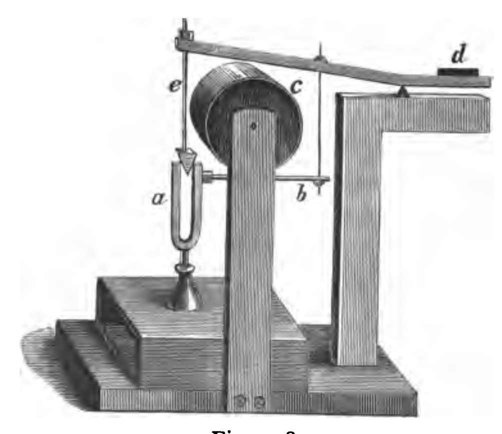


Fig 218.

Praktischer in dieser Hinsicht construirte Buschmann sein »Terpodium«, von welchem ein vollständiges Exemplar Sie hier sehen. Die Transversalschwingungen der Stäbe, welche für die tieferen Tonlagen aus Holz, für die höheren aus freien Eisenlamellen bestehen, die in ihren Knotenpunkten befestigt sind, werden durch die Reibung einer rotirenden glatten Holzwalze *a* (Fig. 219) mit Ausschluss von

Feuchtigkeit oder sonstiger Frictionsmittel eingeleitet und unterhalten, welche Reibung an einem, mit einem Streifen gegärbter Rennthierhaut (*b*) versehenen Holzklötzchen (*c*) erfolgt. Letzteres ist mit dem Klangstabe (*d*) mittels eines auf dessen Ebene senkrecht befestigten Drahtes (*e*) verbunden. Die durch die Reibung zwischen Walze und Haut entstehenden Erschütterungen leiten die Schwingungen des Stabes ein, die, rückwirkend, Tempo und Isochronismus der Reibungsangriffe bestimmen.

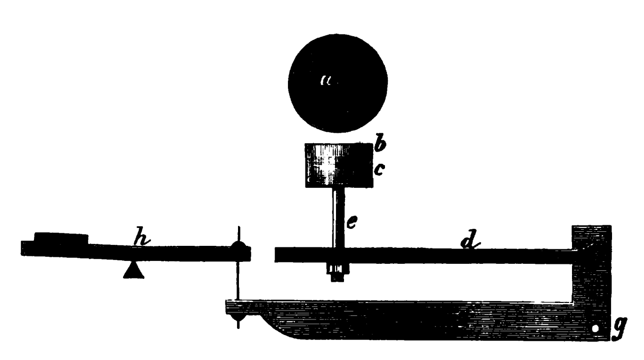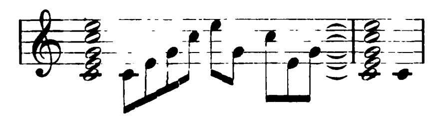


Fig. 219.

Das Winkelstück (*f*) ist bei (*g*) beweglich, um dasselbe mit allen seinen Bestandtheilen mittels der Taste (*h*) heben und so die Reibungsfläche der Walze nähern und an diese mehr oder weniger stark andrücken zu können.

Die Töne des Terpodiums, deren Klangfarbe je nach der Tonlage Aehnlichkeiten mit Flöte, Clarinette, Horn und Fagott aufweist, sprechen, zumal in der Höhe, präcise an. Da die Tonstärke lediglich vom Fingerdrucke auf die Taste abhängt, so lässt sich jeder einzelne Ton gegenüber den übrigen in beliebiger dynamischer Abstufung hervorbringen, so dass Stellen, wie z. B. diese



mit vollster Deutlichkeit hervorgebracht werden können. —

Es könnte die Frage entstehen, ob diese letztere Eigenschaft, der Orgel gewonnen, für dieses Instrument nicht ebenso eine Ver-

vollkommnung bedeuten würde, wie etwa die Gewinnung der Continuität des Klanges für das Clavier.

In der That fehlte es nicht an solchen Bestrebungen. Inwiefern sie aber selbst bei vollem Gelingen als ein wirklicher Fortschritt, als ein Gewinn im künstlerischen Sinne hätten angesehen werden können, wollen wir ein wenig näher untersuchen.

Hinsichtlich des Clavieres hatte es lange den Anschein, als seien derartige Versuche, zu welchen das Schicksal ihrer Vorgänger so wenig aufzumuntern geeignet war, endgiltig aufgegeben. Die »Bogenclaviere«, »Gambenflügel«, »Geigenclavicymbel«, »Xenorphikas« u. s. w., die im vorigen Jahrhunderte wie Pilze hervorschossen, verschwanden ebenso bald wieder.

In neuester Zeit nun sind wieder einige derartige Experimente aufgetaucht. — Eines derselben, das von D. Eisenmann in Berlin, in den Hamburger Signalen F. M. 1891 Nr. 15 angezeigte elektrophonische Clavier, kann insoferne auf einiges Interesse rechnen, als es ein modernes Mittel zur Erregung und Fortdauer des Klanges in Anwendung bringt: den Elektromagnetismus. — Die Saite wird mittels Hammerschlages in Schwingung gesetzt, und darin durch den Elektromagneten erhalten, oder sie kann auch ohne Anschlag durch den Elektromagneten allein tönen gemacht werden, und zwar ungefähr in der Art unseres, Ihnen aus dem 21. Vortrage (Fig. 153) erinnerlichen elektrischen Monochordes.

Diesem, hinsichtlich der beabsichtigten Leistung ziemlich ähnlich ist die »Saitenorgel«, erfunden von C. Gumbel und angezeigt in der Zeitung für Instrumentenbau, Leipzig 1891, Nr. 5.

Dieses Instrument ist eigentlich ein Hammerclavier, dessen Saiten in beliebig langer Dauer und in beliebigen Stärkeabstufungen tönend zu erhalten, das Ziel dieser Erfindung bildet. Dieses Ziel wird erreicht durch mit den Saitenchören gleichgestimmte Zungen, deren mittels Wind hervorgerufene Vibrationen die Saiten (ob durch Resonanz oder Luftstösse? ist nicht gesagt) in Schwingung setzen und erhalten, gleichviel, ob letztere durch Hammeranschlag oder auch ohne diesen lediglich durch die Zunge zur Ansprache gebracht werden.

Der Versuch, Streichinstrumente mittels einer Claviatur zu spielen, wurde schon wiederholt in älterer Zeit gemacht. Mit einem solchen

debutirte neuerer Zeit ein Herr Franz Kühmeyer in Pressburg mit einem von ihm ersonnenen »Streichclavier«. Dasselbe beherbergt in seinem Inneren sechs Violinen, zwei Violen und zwei Violoncelle.

Um die Saiten dieser zehn Instrumente wird, wenn gespielt werden soll, ein endloses Lederband (wahrscheinlich mittels eines Trittes) in stetige Circulation gesetzt. — Die gespielte Taste drückt das Band an die betreffende Saite, wodurch diese gestrichen und je nach dem Tastendrucke stärker oder schwächer ertönen gemacht wird. —

In welcher Weise die Saite für den betreffenden Ton abgegrenzt wird, ist der Beschreibung nicht zu entnehmen. — Einen ähnlichen Zweck verfolgte ein in der Wiener Weltausstellung 1873 zu sehen gewesenes Piano-Quatuor von Baudet in Paris.

Mit diesen Experimenten, die selbst auf die Genugthuung, von den Zeitgenossen auf kurze Weile, etwa wie seinerzeit Chladny's »Claviercylinder«, angestaunt zu werden, heute in befriedigendem Masse kaum zu zählen haben dürften, sind Verbindungen zweier selbstständiger Instrumente nicht zu verwechseln, wie solche in früheren Zeiten zwischen Clavier und Orgel versucht wurden, dann die der neueren Zeit angehörenden Verbindungen von Clavier mit Physharmonika, wie das Lickl-Clavier, oder mit Harmonium, wie das grosse, im Besitze Franz Liszt's gewesene und nunmehr in unserem Museum befindliche Exemplar (Pleyel-Clavier mit Alexander-Harmonium), sowie eine ganz gleiche Combination neuesten Datums, das »Linardion«.

Das Clavier dürfte, gleichwie längst die Geige, auf dem Culminationspunkte seiner Vollendung überhaupt angelangt sein.

Was man an seinem tönenden Principe: der angeschlagenen Saite, immer ändern wollte, könnte (selbst wenn der neueste Versuch: die Fortdauer des Tones mittels Elektricität zu bewirken, vollständig gelingen sollte) nur zum Nachtheile seiner Eigenart ausschlagen. Es ist ja immerhin möglich, dass es durch Eigenschaften, die ihm fehlen, zu einem vollkommeneren Instrumente gemacht werden kann; allein ein Clavier wird es dann gewiss nicht mehr sein.

Was aber die Orgel betrifft, an welcher mit Compensationspfeifen und Ausdrucksvorrichtungen ebenfalls reichlich herumexperi-

mentirt wurde, [1]) so verfügt sie heute über dynamische Behelfe bereits in solcher Fülle, dass diese unter den Händen eines geschmacklosen Spielers oder Componisten dem ästhetischen Charakter dieses Tonorganes sogar schon leicht gefährlich werden können.

Auf dem Harmonium gestattet die Vorrichtung des sogenannten Doppeldruckes den einzelnen Ton hervorzuheben. Allerdings ist der Uebergang vom wenig zum ganz geöffneten Ventil kein allmäliger, sondern ein plötzlicher, daher auch der Effect nicht der des Anschwellens. — Wenn ungeachtet dieser Fähigkeit und seiner vielen sonstigen Vorzüge, wie Continuität und Modulationsfähigkeit des Tones, präcise Ansprache, geringe Verstimmbarkeit, das Harmonium seinen Rang unter den Tasteninstrumenten erst nach dem Clavier und der Orgel einzunehmen bestimmt erscheint, so liegt dies hauptsächlich an der geringen Schallkraft und der von den hohen und unharmonischen Obertönen herrührenden Leere des Klanges der freien Zunge, mithin in ihrer akustisch minderwerthigen Tonquelle begründet.

Was dem Clavier und der Orgel die Superiorität unter den Tasteninstrumenten wohl für immer sichern dürfte, ist — abgesehen von der reichen und bedeutenden Literatur — eben der Umstand, dass sie auf den akustisch vollkommensten Klangquellen, der Saite und der Luftsäule, beruhen.

---

34. Vortrag.

(Stäbe. Combinirte Querschwingungen. — Lissajous-Figuren.)

Einer zweiten, ebenso interessanten als wichtigen Erscheinung, welche die transversalen Schwingungen einseitig befestigter gerader Stäbe begleitet, wollen wir eine etwas eingehendere Betrachtung widmen.

---

[1]) Ausser dem Weber'schen Compensationsversuche sind Expressionsprojecte in Menge aufgetaucht. Das Neueste lieferte der Orgelbauer Fabian in Bromberg, worauf in meinen Vorträgen über Orgelbau näher eingegangen wird.

In ihrer ursprünglichen einfachsten Form hat dieselbe weder musikalische noch akustische Bedeutung, und bietet lediglich physikalisches Interesse dar. Allein in ihrer weiteren Ausbildung gestaltete sich diese Erscheinung zu einem sehr wichtigen Mittel für die Erforschung und Darstellung akustischer Vorgänge. In einer Richtung, die als optische bezeichnet wird, führte sie zu einer der feinsten Methoden behufs Bestimmung der Schwingungszahl tönender Körper und insbesondere von Stimmgabeln, nämlich zum Lissajous'schen »Comparateur«, beziehungsweise zur König'schen »Stimmgabeluhr«, von welchen Apparaten in dem, von den verschiedenen Methoden zur Ermittlung absoluter Schwingungszahlen handelnden Anhange ausführlicher die Rede sein wird. In der anderen Richtung wurde sie der Ausgangspunkt der sogenannten graphischen Methode für die bleibend sichtbare, automatische Darstellung von Schwingungsgebilden, welche aus dem Zusammenwirken zweier, mit ungleichen Schwingungszahlen und in gleichen oder verschiedenen Richtungen oscillirender Körper resultiren. Auch diesfalls werden wir gelegentlich der Abhandlung über die Interferenzerscheinungen experimentelle Versuche anzustellen in die Lage kommen.

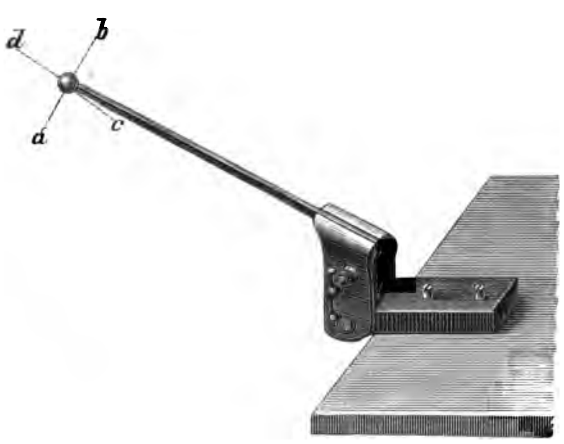


Fig. 220.

Vorläufig aber wollen wir uns nur mit der Grunderscheinung selbst befassen.

Ein beliebig längeres Stückchen steifen Drahtes (etwa eine Stricknadel) genügt zu dem Experimente. Ein Ende des Drahtes versehen wir mit einem Klümpchen Wachs und dieses, um einen glänzenden Punkt zu bekommen, mit einem Splitterchen einer Glasperle oder Aehnlichem. Das andere Ende wird in einen Schraubstock fest eingespannt (Fig. 220).

Ziehen wir nun dieses Stäbchen (um es durch Auslassen in Schwingung zu versetzen) in diagonaler, d. h. in einer Richtung bei Seite, welche zwischen der senkrechten und der parallelen Linie zur Schraubstockbacke liegt, also in der Richtung *a*—*b* oder *c*—*d* der Figur, so wird, ist der Draht rund, das freie Ende desselben Schwingungsformen sehen lassen, die zwischen Linie, Ellipse und Kreis



Fig. 221.

wechseln, oder aber eine der unzähligen Phasen zwischen diesen Formen constant beibehalten (Fig. 221).

Ruft man nebst dem Grundtone zugleich einen der nächsten Obertöne durch Streichen mit dem Bogen hervor, so werden die leuchtenden Linien der Figur Kräuselungen (Fig. 222) sehen lassen, die, je höher der Oberton, um so zahlreicher auftreten werden. Die

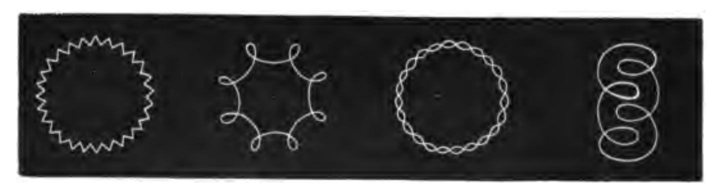


Fig. 222.

Obertöne gleicher Ordnung werden stets Einklänge bilden, gleichviel in welcher Ebene eines Längsschnittes man den Bogen führt.

Klopft man den Draht mehr oder weniger flach, oder feilt man ihn längs einer Seite mehr oder weniger eben, so werden die verschiedensten Figuren entstehen, die gleichfalls entweder eine Reihe wechselnder Phasen durchlaufen oder in einer dieser Phasen constant verharren. — Dieser Stab schwingt im Verhältnisse der Quarte, nämlich wie 4 : 3 (Fig. 223). Ruft man beliebige Obertöne gleicher Ordnung durch Streichen der beiden Ebenen mit dem Bogen hervor, so werden sie alle das Intervall der Quarte hören lassen, sowie im früheren Falle jenes des Einklanges.

Die Erscheinung, welche mit den Ihnen bereits bekannten mannigfaltigen Lichtfiguren, die der glänzende Punkt einer an verschiedenen Stellen und in verschiedener Weise in Schwingung versetzten Saite beobachten lässt, einige Aehnlichkeit aufweist, wiewohl deren Entstehen dort in einer ganz anderen Ursache, nämlich in der Ueberlagerung verschiedener gleichzeitiger Wellenzüge, zu suchen ist, entsteht hier dadurch, dass der Stab abwechselnd nach zwei verschiedenen Richtungen schwingt. Erfolgen die beiden Schwingungen genau in dem Zeitverhältnisse 1 : 1, so wird die jeweilige Phase der dieses Verhältniss bezeichnenden obigen Figur stabil bleiben, was jedoch sofort aufhört, sobald das Verhältniss nur im geringsten alterirt wird. In gleicher Weise wird sich das Verhältniss 1 : 2, 1 : 3, 2 : 3, 3 : 4, 4 : 5 u. s. w. oder eine sonstige beliebige Relation in

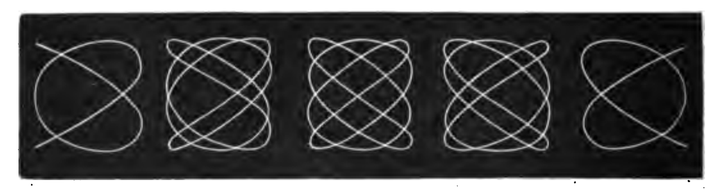


Fig. 223.

einer bestimmten Figur ausdrücken, deren einige aus den folgenden Zeichnungen (Fig. 224) zu ersehen sind, und zwar mit constanter Phase, wenn das Verhältniss absolut genau, in wechselnder, wenn es nur im mindesten ungenau ist.

Bei Vergleichung dieser Lichtfiguren erkennt man sofort ihren gemeinsamen Ursprung, möge ihre Gestalt eine noch so mannigfaltige sein, denn sie setzen sich durchwegs aus mehr oder weniger gekrümmten, innerhalb der jeweiligen Schwingungsweite der Figur im rechten Winkel sich kreuzenden Bögen zusammen. Denn, wenn ein Stab, sei es in Folge ungleicher seitlicher Abgrenzung durch den Schraubstock, oder in Folge ungleich starker Seiten nach einer Richtung rascher schwingt als nach der anderen, so müssen nothwendig Kreisbewegungen entstehen, die sich bei kleineren Differenzen des gegenseitigen Verhältnisses der Schwingungszeiten in schnellen oder langsamen wiederkehrenden Phasen derselben Figur auflösen, bei grösseren Differenzen der gegenseitigen Schwingungszeiten aber zu anderen, ebenfalls von ihren bezüglichen Phasen begleiteten Figuren sich

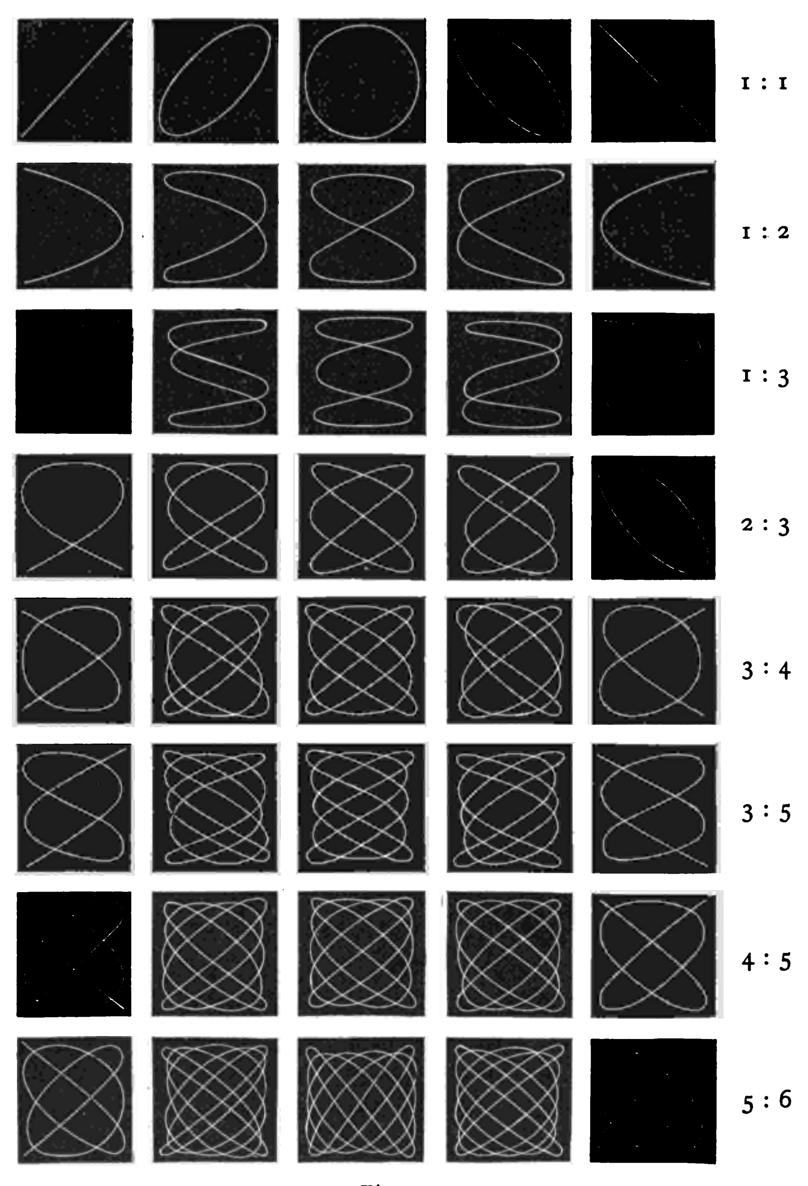


Fig. 224.

formen. Auch hier kommt das Gesetz, wonach dem einfachsten Tonverhältnisse die einfachste Figur, und umgekehrt verwickelteren Ton-

verhältnissen auch verwickelte Figuren entsprechen, zur vollen Geltung. Von der Aufeinanderfolge der Bewegungen dieser Curven gibt das untenstehende, das Verhältniss von ± 1 : 1 darstellende Diagramm (Fig. 225) die beste Vorstellung, wenn man den Linien in folgender Reihe *ab* 1 *a* 2 *b* 3 *a* 4 *bc* 5 *d* 6 *c* 7 *d* 8 *c* o *d* o *c* 8 *d* 7 *c* 6 *d* 5 *cb* 4 *a* 3 *b* 2 *a* 1 *b* o *a* o *b* u. s. w. nachgeht, wodurch sich auch zugleich die Drehung der Figuren erklärt. — Diese durch ihre Leichtfasslichkeit ausgezeichnete Darstellung rührt von Chladny her, der diese Schwin-

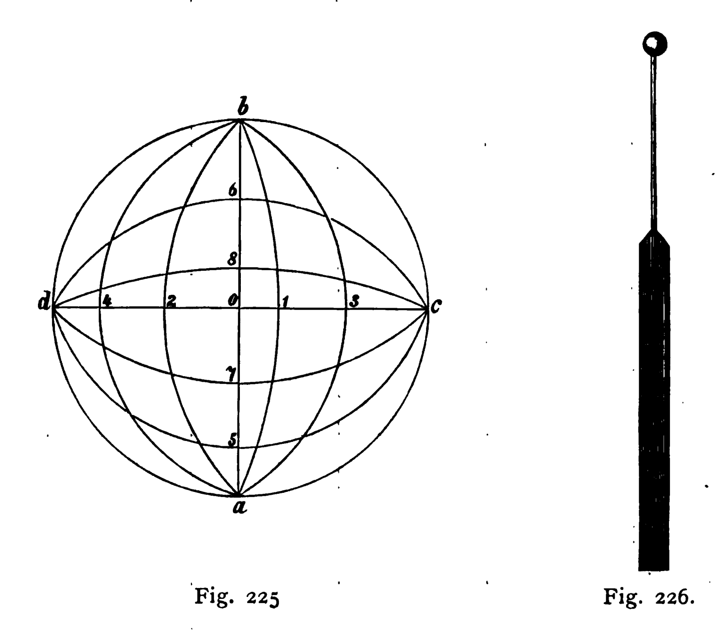


Fig. 225 Fig. 226.

gungsart in ihrer einfachsten Form ebenfalls schon gekannt und als das Beisammensein von schwingenden, d. h. linearen, und von Kreisbewegungen bezeichnet, jedoch nicht weiter verfolgt hat. Die in der Zeichnung der Deutlichkeit wegen weitaus zu gross dargestellten gegenseitigen Abstände der Bögen sind selbstverständlich in Wirklichkeit um sehr Vieles geringer und dies umsomehr, je grösser die Schwingungszahlen, und je kleiner deren Differenzen sind.

Statt nun für jedes der möglichen verschiedenen Schwingungsverhältnisse besondere Stäbe zu construiren, bedient man sich zur Demonstration der Erscheinung selbst zweckmässig eines sogenannten Kaleidophons (Fig. 226), bestehend aus schmalen, dünnen Linealen

(etwa gerader Uhrfedern), welche in ihrer Längenachse im rechten Winkel aneinander gelöthet sind, demzufolge, wenn das eine horizontal schwingt, das andere vertical schwingen muss. Das Ende des einen Lineals wird mit einem glänzenden Knopfe versehen, das andere Lineal wird auf kürzere oder längere Strecken in den Schraubstock eingespannt, wodurch die verschiedenen Schwingungsrelationen zwischen beiden Linealen hergestellt werden. Noch deutlicher lässt sich die Erscheinung einem grösseren Zuseherkreise mittels zweier rechtwinkelig zu einander schwingender geschlitzter Scheiben (Fig. 227) und des Projectionsapparates zur Anschauung bringen.[1])

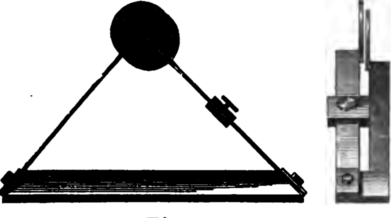


Fig. 227.

Um nun aber den Gang dieser rechtwinkelig aufeinander gerichteten beiderseitigen Bewegungen verfolgen zu können, sind die bisher ausgeführten Darstellungen durch Stäbe, Kaleidophon und Scheiben, sowie die auf gleicher Entstehungsweise beruhenden Lichtfiguren, die zum Schlusse mit Stimmgabeln dargestellt werden sollen, wegen ihres zu raschen Verlaufes nicht geeignet; denn sie zeigen zwar das fertige Bild, aber nicht das Entstehen desselben. — Letzterem Zwecke nun dient ein Fadenpendel mit entsprechend grosser und schwerer Kugel in sehr instructiver Weise. — Einmal kann man seine langsamen Bewegungen mit dem Auge ohne Mühe verfolgen, zumal wenn man die Kugel entweder von oben beleuchtet, und deren Schatten auf eine weisse Fläche projectirt, oder wenn man die Kugel am Fusspunkte mit einem feinen Haarpinsel versieht, der ihre Schwingungen auf eine berusste oder bestaubte Glastafel zeichnet, eine Methode, deren wir uns bedienen wollen.

Ziehen wir die Kugel aus ihrer Ruhelage und überlassen sie ihren Bewegungen, so werden diese in einer geraden Linie erfolgen, die man die Schwingungsebene nennt. Der Pinsel wird eine gerade Linie beschreiben. Geben wir der Kugel in dem Momente, als sie den äussersten Punkt ihrer Schwingung erreicht, einen in rechtwinkeliger Richtung zur Schwingungsebene geführten Stoss, so wird

[1]) Wird demonstrirt.

die Kugel, durch ihre Befestigung an den Faden, daran gehindert, dieser Richtung nicht folgen können, sondern einen, im Verhältnisse zur Kraft, mit der wir den Stoss geführt, mehr oder weniger gekrümmten Bogen beschreiben (Fig. 228), den die Kugel beim Zurückschwingen selbstverständlich in verkehrter Richtung, aber in gleicher Weite fortsetzen wird, welcher Bogen die Figur einer Ellipse bilden, die bei stärkerem Anstosse zum Kreise, bei noch stärkerem zu einer, gegen die bisherige Schwingungsebene senkrecht schwingenden Ellipse werden wird.

Erfolgt der Stoss in dem Momente, als die Kugel durch die Ruhelage geht (Fig. 229), so wird sie nun in einer mehr oder minder diagonalen (schrägen) Richtung entweder linear, oder in mehr oder minder flachen Bögen, also wieder ellipsenartig, schwingen. Erfolgen die Impulse zwischen diesen beiden Punkten an einer beliebigen Stelle, so werden Figuren entstehen können, die alle Formen zwischen Linie und Kreis durchlaufen. Jede dieser Formen wird stabil bleiben, wenn die Impulse nicht nur zeitgleich, d. h. stets an derselben Stelle erfolgende sind, sondern auch mit unveränderter Intensität sich in beiden Richtungen wiederholen. Bei der geringsten Veränderung eines dieser Factoren wird die Figur alle ihr möglichen Phasen langsamer oder schneller durchlaufen und zwar in abwechselnden Drehungsrichtungen. —

Denken wir uns nun diese Stösse durch die Schwingungen eines zweiten ganz gleichen Pendels bewirkt, so wird es nur auf den Punkt ankommen, in welchem ihre beiden Bahnen zusammentreffen, um die Form der Figur zu bestimmen, die unter der Voraussetzung der absoluten Gleichheit aller Verhältnisse constant bleiben wird. Bei Aenderung dieser Verhältnisse wird der Gang beider Pendel ungleich werden und folglich eines dem anderen bei jeder Schwingung um Einiges voraneilen. Demnach werden die Impulse bei jeder Schwingung an anderen Punkten der Bahnen stattfinden und daher auch die Form der Figur alle ihr zukommenden Veränderungen durchmachen, und dies um so geschwinder, je grösser der Gangunterschied der beiden Pendel ist. —

Befestigen wir an die Kugel unseres Pendels ein zweites Fadenpendel (Fig. 230), dessen gleichfalls mit einem Pinselchen versehene Kugel kleiner und dessen Faden viermal kürzer ist, so wird dieses

Pendelchen — zufolge des Ihnen bekannten Verhältnisses zwischen Pendellängen und Schwingungszahl — noch einmal so schnell schwingen. Machen wir nun dieses Pendelchen in senkrechter Richtung zur Schwingungsebene des grossen Pendels oscilliren, so wird ersteres während eines Hin- und Herganges der grossen Kugel zweimal hin- und zweimal herschwingen, dieses jedoch nicht in derselben Ebene bewirken können, weil es, an die Bahn der grossen Kugel gefesselt, auf jedem Punkte seiner Bewegungen diese Richtung ändern muss, das kleine Pendel wird demnach während einer jeden Oscillation des grossen zwei mehr oder minder flache parabelartige Curven (Fig. 231)[1] beschreiben, deren Scheitel abwechselnd nach oben und unten gerichtet sind und beim Rückgange des grossen Pendels diese Curven in verkehrter Richtung wiederholen. Das Resultat eines Hin- und Herganges der grossen Kugel wird eine vom Pinsel der kleinen Kugel gezeichnete 8, eine sogenannte Lemniskate sein. Die Beständigkeit dieser Figur oder eine ihrer verschiedenen Umwandlungsphasen hängt davon ab, dass die Längen der beiden

Fig. 228. Fig. 229. Fig. 230.

[1] Diese scheinbar parabolischen Bögen sind in Wirklichkeit zwei geschlossene Curven, die sich auf- und abwärts bewegen (Fig. 232).

Pendel genau dem Verhältnisse 1 : 4 entsprechen; bei der geringsten Abweichung wird die Figur in keiner Phase verharren, sondern alle ihr zukommenden Veränderungen durchlaufen, weil das kleine Pendel seine beiden Bewegungen bereits vollendet, oder noch nicht vollendet haben wird, wenn das grosse mit den seinen zu Ende gekommen ist.

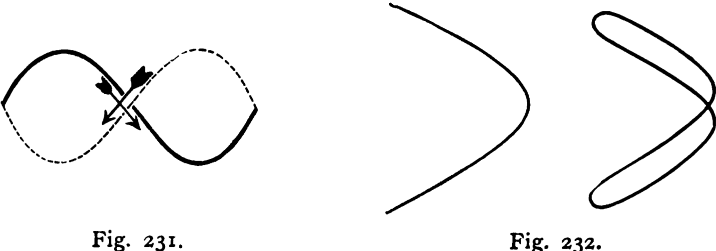


Fig. 231. Fig. 232.

Ob die Figur eine mehr oder weniger gestreckte Gestalt annimmt, bestimmt der Winkel der Schwingungsebene des kleinen zu jener des grossen Pendels.

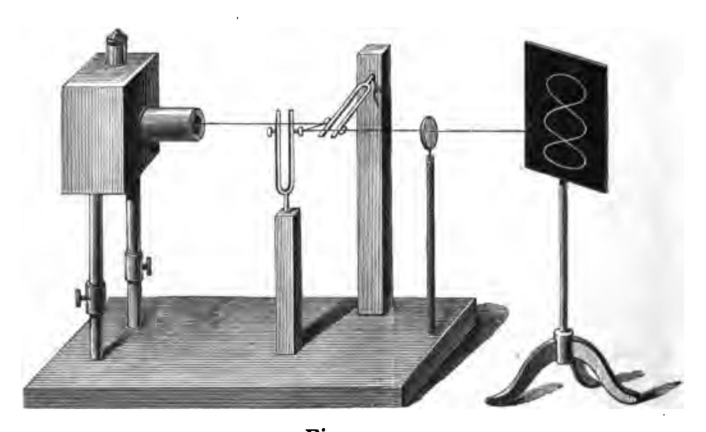


Fig. 233.

Dass die einzelnen Figuren den Schwingungsverhältnissen bestimmter musikalischer Intervalle entsprechen, davon haben wir uns bereits im Allgemeinen durch die Versuche an den Stäben überzeugt. Dieser Zusammenhang brachte den französischen Physiker Lissajous auf den Gedanken, die Figuren zur Controle der Schwingungszahlen von Stimmgabeln zu benützen. Das Princip seiner Methode ersehen

Sie aus diesem Apparate (Fig. 233), der sich von dem, für den erwähnten praktischen Gebrauch in Verwendung gelangenden sogenannten Comparateur nur durch jene Abänderungen der Anordnung unterscheidet, wie sie zum Zwecke der Projection der Figuren erfordert wird, um diese einem grösseren Kreise sichtbar zu machen.

Die Anordnung besteht im Wesentlichen darin, dass man zwei rechtwinkelig zu einander schwingende Stimmgabeln mit spiegelnden Flächen versieht, und auf die eine einen Lichtstrahl fallen lässt, der, von der anderen reflectirt, auf einen Schirm projectirt wird.

Die beiden Lichtpunkte werden sich nothwendig zu einer dem betreffenden Intervalle entsprechenden Lichtfigur verbinden, die, sobald das Intervall vollkommen genau ist, sich in einer bestimmten Phase dauernd erhalten wird. — Sie hatten zuvor schon Gelegenheit, die Ueberzeugung zu gewinnen, dass das Verharren einer solchen Lichtfigur in einer ihrer Phasen auf die Richtigkeit des betreffenden Intervalles zu schliessen berechtigt. Ist nun die Schwingungszahl der einen Gabel bekannt, so leuchtet ein, dass man aus der betreffenden Figur und deren Stabilität, aber ebenso auch aus der Zeit, in welcher die Figur, wenn sie nicht stabil ist, ihren Verwandlungsprocess vollendet, die Schwingungszahl der anderen Gabel mit vollkommener Genauigkeit ableiten kann.

Folgendes Beispiel wird letzteren Satz erläutern.

Setzen wir den Fall, es seien zwei Stimmgabeln zu vergleichen, von welchen angenommen wird, dass beider Schwingungszahlen dem Normal-$a = 870$ Schwingungen entsprechen.

Bei Beobachtung ihrer Lichtfigur zeigt sich jedoch, dass diese nicht stabil ist, sondern den bekannten Cyclus ihrer Verwandlungsphasen durchmacht und hiezu 10 Secunden benöthigt. — Offenbar wird also eine Gabel der anderen um $^1/_{10}$ Secunde voraneilen und eine der Gabeln in dieser Zeit 8700, die andere 8701 Schwingungen vollenden.

Sollte der Umlauf der Verwandlungen statt 10 60 Secunden erfordern, so wird die eine Gabel in dieser Zeit 52.200, die andere 52.201 Schwingungen vollführen, mithin das Intervall sich wie 1 zu 1·000.019 $\left(= \frac{52.201}{52.200}\right)$ verhalten und hiernach der Unterschied für

die Schwingungszahl der verglichenen Gabel $\pm {}^{16}/_{1000}$[1]) einer Schwingung in einer Secunde betragen.

Dieses Beispiel lässt die ungemeine Genauigkeit erkennen, mit welcher sich bei Anwendung dieser Methode Stimmgabeln vergleichen, beziehungsweise deren Schwingungszahlen bestimmen lassen.

Die Art ihrer praktischen Anwendung wird in dem schon zuvor erwähnten Anhange des Näheren erörtert werden.

Wir wollen diesen Gegenstand mit der Erklärung einiger Erscheinungen abschliessen, welche sich bei unseren Versuchen ergaben.

1. Streicht man eine der Gabeln in der Art, dass nebst dem Grundtone zugleich einer der Obertöne auftritt (man erreicht dies unschwer, wenn man den Bogenstrich näher dem Sattel und mehr an der Kante der Gabelzinke führt), so erscheinen die, die Figur bildenden Linien gekräuselt, welche Erscheinung von uns bereits bei den kaleidophon'schen Stäbchen beobachtet worden sind.

2. Versetzt man eine der beiden Gabeln allein in Schwingung, so bemerkt man, dass die äussersten Punkte der Schwingungsbahn bedeutend lichter sind, als die Bahn selbst und die Form einer hellen Scheibe haben. —

Diese Lichtstärke, sowie die Form rühren daher, dass die Lichtscheibe, die ja nichts anderes ist, als das Bild des aus dem Projectionsapparate kommenden, und von den Spiegeln der Gabeln reflectirten, die Schwingungsbahn bildenden Lichtstrahls, während des unmessbaren Momentes ihres Stillstandes vor der Umkehr einen stärkeren Reiz auf die Netzhaut des Auges übt und daher auf derselben einen nachhaltigeren Eindruck zurücklässt.

In Figuren mit langsamer Phasenänderung (am leichtesten in der Figur des Einklanges) lassen sich die Wanderungen der Lichtscheibe deutlich wahrnehmen und gut verfolgen.

Die bei der Wiederkehr der Phasen abwechselnd nach entgegengesetzten Richtungen stattfindende Rotation der Lichtscheibe liefert den Beweis für die Richtigkeit der an der Figur 225 dargelegten Bewegungstheorie.

3. Da in der Zeit, in welcher die gleiche Phase einer Lichtfigur wiederkehrt, eine Gabel der anderen um eine verdichtende oder

---

[1]) $\frac{1 \times 870}{52.201} = 0{\cdot}016.$

verdünnende Schwingung vorausgeeilt ist, so entsteht nothwendig eine Schwächung oder Verstärkung des Klanges, die sich dem Gehöre als eine mit der Wiederkehr der Phase des Lichtbildes genau zusammenfallende Schwebung kundgibt.

Endlich sei noch auf das interessante Moment hingewiesen, dass die Anzahl der senkrechten und der wagrechten Ausbiegungen einer jeden dieser Lichtfiguren (vgl. Fig. 224), wenn sie vollständig ausgebildet sind, den Verhältnisszahlen des betreffenden Intervalles entspricht, welches man sonach, ohne es zu hören, an den Zahlen dieser Ausbiegungen zu erkennen vermag.

---

35. Vortrag.

(Transversalschwingungen gekrümmter Stäbe.)

Unsere bisherigen Betrachtungen galten den Querschwingungen eines geraden Stabes. Es fragt sich nun, wie werden sich diese Schwingungen verhalten, wenn wir den Stab in eine gekrümmte Form überführen? Wir können aus einem Stabe, besonders aus einem metallenen, geschlossene oder offene Ringe, Ellipsen, Vielecke bilden; wir können ihn nur theilweise an einem oder beiden seiner Enden mehr oder weniger convergirend krümmen, ebenso können wir ihn in der Mitte biegen und die Schenkel einander immer mehr nähern, bis der Stab zur Gabel mit parallelen oder sogar gegen einander geneigten Zinken geworden ist.

Ein solcher Art gekrümmter Stab, die Stimmgabel, spielt eine wichtige Rolle nicht nur in der Musik, als die Verkörperung eines bestimmten, unveränderlichen Tonmasses, auf welchem die Stimmung der Musikinstrumente beruht, sondern auch in verschiedenen Wissenschaftszweigen (Physik, Mechanik, Telegraphie, Astronomie), insbesondere aber in der Akustik, vermöge ihrer Eignung zur exacten Messung und Zählung überaus kleiner Zeittheile.

Aus Figur 234, welche die allmälige Ueberführung eines geraden freien Stabes in die Gabelform versinnlichen soll, ersieht man, dass

die Schwingungsknoten mit zunehmender Biegung immer näher zur Mitte rücken, was sich durch Sand oder Reiter nachweisen lässt.

Der Ton, in nothwendiger Folge der, durch das Zurückweichen der Schwingungsknoten grösser werdenden Schwingungsstrecken, wird zunehmend tiefer, und beträgt diese Vertiefung mehr als eine Quinte.

Die dem Grundtone zukommende Schwingungsart einer Stimmgabel lässt sich besonders bei langen Zinken derselben ohne weitere Hilfsmittel leicht erkennen. Die Zinken schwingen gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung abwechselnd nach aussen und innen (Fig. 235).

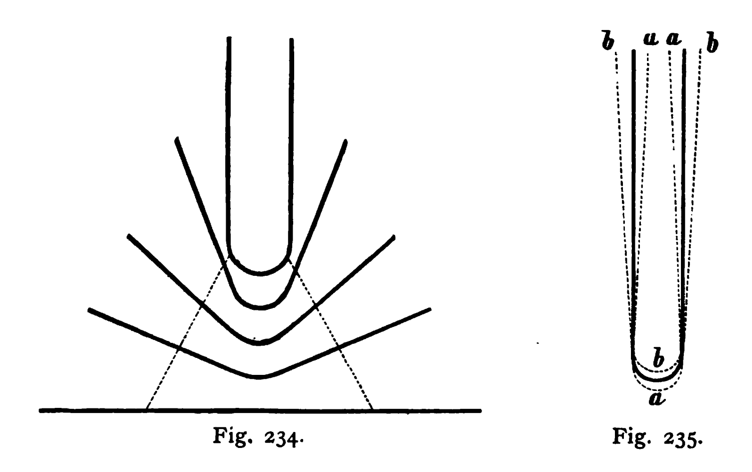


Fig. 234. Fig. 235.

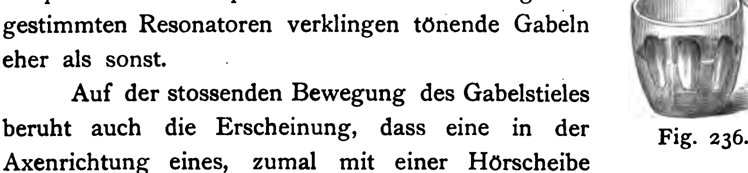
Die Lage der Schwingungsknoten der Partialtöne einer Gabel wird in gleicher Weise durch Sand oder Reiter constatirt.

Dass die Schwingungsknoten des Grundtones sich an der bezeichneten Stelle befinden, beweist das Forttönen der Gabel, wenn sie an diesen Punkten gegen irgend einen festen Körper, etwa an den Rand eines Trinkglases (Fig. 236) oder an die Kante einer Tischplatte, angestemmt wird, während bei Anstemmung an einer anderen Stelle die Schwingungen sofort aufhören.

Bringt man in die Mitte der Biegung einen Stiel an, so wird dieser eine aufwärtsgehende Bewegung erhalten, wenn die Zinken nach aussen, und eine entgegengesetzte, wenn sie nach innen schwingen. Diese Bewegung ist es, mittels welcher sich die Vibrationen der Gabel auf grössere mitschwingende Flächen, wie auch

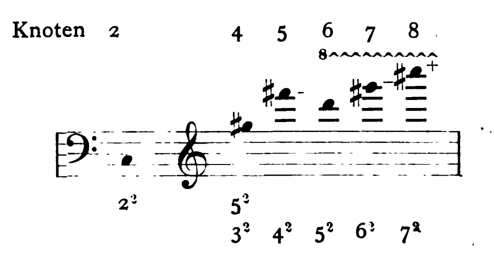
auf, durch diese abgegrenzte Lufträume (sogenannte Klangkästchen) übertragen, wodurch deren Klang, der ohne eine solche Verbindung mit Resonanzflächen- und Räumen nur sehr schwach gehört wird, eine bedeutende Verstärkung erfährt.

Auf eine Fläche leicht aufgesetzte, ebenso mit Klangkästchen verbundene Gabeln verklingen jedoch sehr rasch, während frei gehaltene oder mit schweren Körpern fest verbundene lang tönen, weil in diesen Fällen ihre Schwingungen durch Uebertragung auf einen mitschwingenden Körper nicht erschöpft werden. Auch vor gleichgestimmten Resonatoren verklingen tönende Gabeln eher als sonst.


Fig. 236.

Auf der stossenden Bewegung des Gabelstieles beruht auch die Erscheinung, dass eine in der Axenrichtung eines, zumal mit einer Hörscheibe versehenen Stabes befestigte Gabel sehr stark gehört wird, wenn man die Scheibe an das Ohr legt. — Eine in gleicher Weise befestigte Lamelle von derselben Dimension, wie die Gabel, wird schwächer gehört, weil ihre Transversalschwingungen auf den Stab nur seitliche Stösse üben können. Auch verklingt der Ton sehr rasch, während der Klang gut construirter und äquilibrirter Gabeln bei dieser Befestigungs- und Beobachtungsweise an zwei Minuten lang verfolgt werden kann. —

Die Aliquotschwingungen der Gabeln verhalten sich: und zwar die beiden ersten wie die Quadrate von 2 und 5, vom zweiten Obertone angefangen aber wie die Quadrate der Zahlen 3, 4, 5, 6, 7 u. s. w., wie aus folgendem Beispiele zu ersehen:



Mit diesen Obertönen sind die, Ihnen aus dem 32. Vortrage her bekannten, als »Lufttöne« bezeichneten, harmonischen Obertöne der Gabeln und Stäbe nicht zu verwechseln, die, wie Sie wissen,

einen ganz anderen Entstehungsgrund haben, welcher bezüglich der Stimmgabeln in der zweiten Abtheilung dieser Vorträge einer noch weiteren Betrachtung unterzogen wird. —

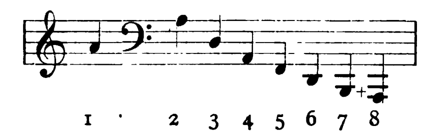
Wird eine Gabel mit einem harten Gegenstande angeschlagen, so tritt der zweite Ton besonders stark, ja viel stärker als der Grundton hervor, verliert sich jedoch bald. Seine Schwingungszahl beträgt ungefähr das Sechsfache des Grundtones. — Um den Grundton einer Stimmgabel rein zu erhalten, muss man sich, wenn man den Ton durch Schlag hervorrufen will, eines belederten oder befilzten, leichten, hölzernen Hammers bedienen, oder die Gabel in der Ebene der Zinken, und zwar nur an einer derselben, mit dem Haarbogen streichen. Streicht man sie senkrecht zur Zinkenebene, so wird der Ton um so höher erscheinen, je mehr Breite und Dicke der Zinken von einander verschieden sind. Aber auch bei ganz gleichen Verhältnissen von Dicke und Breite muss eine Differenz der Tonhöhen sich ergeben, weil die Schwingungen in der Zinkenebene in Folge der Biegung einen weit geringeren Widerstand erfahren, während die Zinke in der anderen Richtung als ein einseitig befestigter Stab anzusehen ist, wodurch ihre Schwingungsfähigkeit erschwert wird, die Schwingungszahl daher eine höhere sein wird. Die Breite der Zinken hat auf die Höhe des Klanges keinen Einfluss, sondern nur auf dessen Quantität, weil sie eine grössere Luftmasse stösst.

Bringt man den Stiel einer schwingenden Gabel mit einem Brette oder Resonanzkästchen in sehr lose Berührung, so kann man einen Ton hervorrufen, der um eine Octave tiefer als der Grundton der Gabel klingt.

Die Erscheinung erklärt sich einfach aus der vorerwähnten Bewegung des Stieles der Gabel, der, wenn die Zinken nach innen schwingen, nach aussen sich bewegt. Demzufolge stösst der Stiel erst bei jeder zweiten Schwingung der Zinken einmal auf die Unterlage, und es muss sonach der durch diese Stösse entstehende Ton nothwendig um eine Octave tiefer sein.

Bei geschickter Handhabung lassen sich auch weitere Untertöne hervorrufen, so dass, wenn jeder dritte, vierte, fünfte u. s. w. Stoss zur Geltung kommt, die Töne im Verhältnisse der natürlichen Zahlen, gleichwie bei den Obertönen, jedoch in verkehrter Reihe aufeinanderfolgen werden.

Also:



Die Erscheinung endlich, dass eine aus einem runden Stabe erzeugte Stimmgabel verschieden hoch klingt, wenn sie in der Zinkenebene oder senkrecht zu ihr gestrichen wird, dürfte hauptsächlich aus der zuvor erwähnten Ursache herzuleiten sein, nämlich aus dem in der Gestalt begründeten Widerstande der Theile, wozu ausserdem auch Ungleichheiten des Querschnittes des Stabes beitragen dürften, wie denn auch Drahtstifte, wenn sie durch Einschlagen in ein Brett befestigt werden, bei verschiedener Streichebene in der That meistentheils verschieden hoch klingen.

Von den mannigfaltigen Biegungen, die man einem Stabe ausserdem noch geben kann, sollen hier nur Ringe und Dreiecke einer kurzen Betrachtung unterzogen werden. Beide können offen oder geschlossen sein, aus runden oder rechteckigen Stäben bestehen, und werden sich am bequemsten aus Metall herstellen lassen. —

Zunächst aber wollen wir den Einfluss überhaupt kennen lernen, welchen das Biegen eines geraden freien Stabes auf dessen Tonhöhe äussert.

Selbstverständlich können aus den unendlich verschiedenen Varianten von Krümmungen, die man einem Stabe geben kann, nur einige Typen dem Versuche unterzogen werden.

Untersuchen wir folgende Biegungsformen, welche wir dem geraden Stabe *a* (Fig. 237) geben, und zwar:

b ein Vierttheil der Länge zum Viertelkreis gebogen;

c an beiden Enden zum Viertelkreis gebogen;

d die Hälfte des Stabes zum Halbkreis gebogen;

e drei Vierttheile der Länge zu einem Dreiviertelkreis gebogen;

f der Stab zum offenen Ringe gestaltet;

g ein Vierttheil der Länge (convergent) zum Dreiviertelkreis gebogen;

h an beiden Enden wie bei *g*;

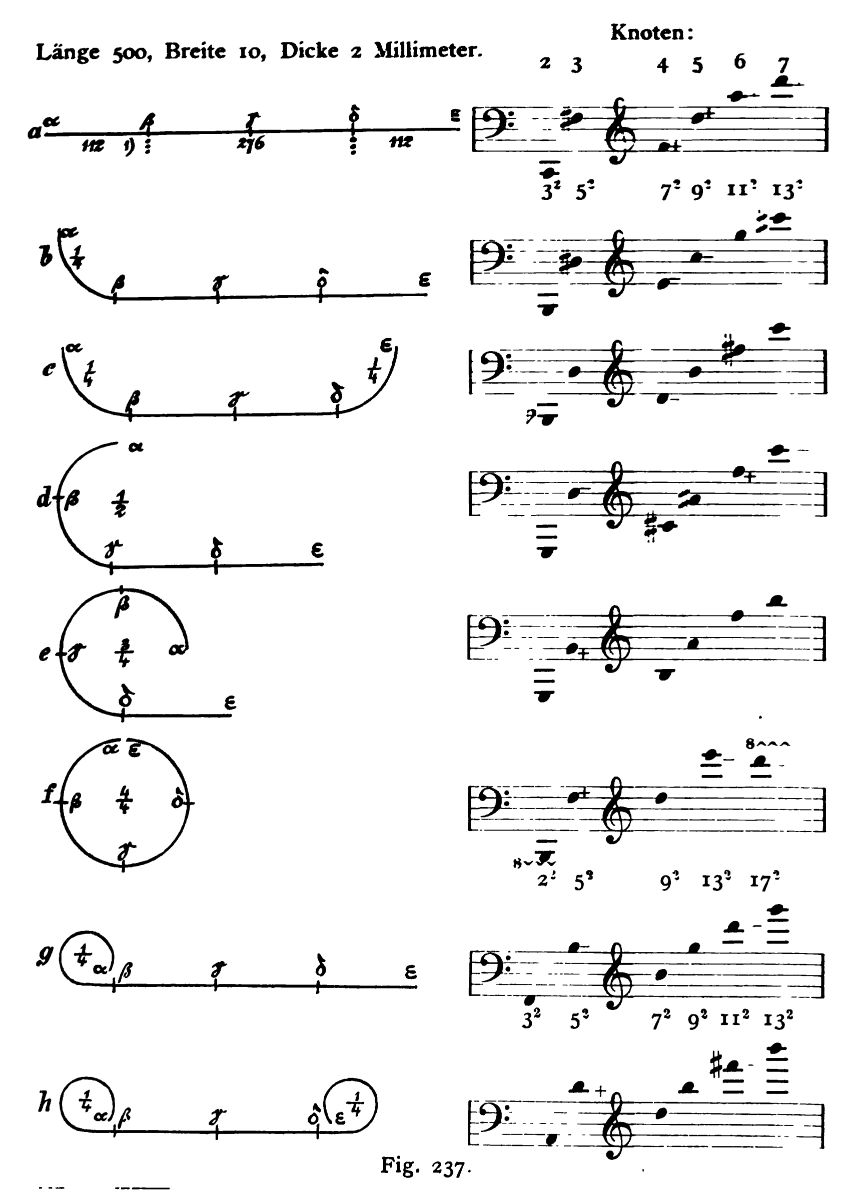


Fig. 237.

[1]) Die Abstände von den Enden des (geraden) Stabes bis zur ersten Knotenlinie betragen für die folgenden Theiltöne, und zwar:

	für den zweiten	dritten	vierten	fünften	sechsten
mit Knoten:	3	4	5	6	7
Millimeter:	66	47	37	30	25

und betrachten wir, welche Veränderung die Tonhöhe bei den verschiedenen Krümmungen erleidet, und wie sich die Abweichungen zur Tonhöhe des geraden Stabes *a* verhalten.

Auch hierbei beschränken wir uns auf die Betrachtung der Aenderungen, die der Grundton erfährt, denn in den relativen Verhältnissen der Partialtöne, die bei den verschiedenen Krümmungen den Grundton begleiten, sind die Abweichungen der Tonfolgen des geraden freien Stabes durchwegs wenig beträchtliche.

Wenn wir nun die aus den verschiedenen Krümmungen resultirenden Tonhöhen mit jenen des geraden Stabes *a* vergleichen, so finden wir, dass das Biegen im Allgemeinen, so lang es keine convergenten Formen annimmt, und so lang ein Theil des Stabes ungebogen bleibt, eine Vertiefung des Tones bewirkt, und dass diese Vertiefung mit der Länge der gebogenen Strecken zunimmt und zwar erst halbtönig, dann ganztönig, so dass die Vertiefung zwischen *a* und *e* eine Quarte beträgt. Weiters zeigt sich, dass die halbe Biegung an einem Ende (*d*) mehr vertieft, als je eine Viertelbiegung an beiden Enden (*e*).

Sobald aber die Biegung bis zur Form eines offenen Ringes (*f*) gediehen ist, ändern sich die Verhältnisse in vielfacher Beziehung ganz wesentlich.

Zunächst sind die, während der vorangegangenen Biegungsarten immer näher gegen die Mitte fortgerückten Knotenpunkte hier einander so nahe gekommen, dass sie gleichsam zusammenfallen, wonach also eine Befestigung als freier Stab nicht mehr möglich wird. Hier greift also die Befestigung in der Art einer Stimmgabel bei x platz, wodurch der Ring in zwei halbkreisförmige Schenkel zerfällt, deren jeder einen an einem Ende befestigten Stab von halber Kreisform darstellt.

Die Schwingungsverhältnisse, beziehungsweise die denselben entsprechenden Tonhöhen folgen jetzt dem Gesetze einseitig befestigter Stäbe, nach welchem die ersten beiden Töne mit den Quadraten von 2 und 5 übereinkommen. — Von da ab entsprechen die Töne nur den Quadraten von 9, 13, 17, 21 u. s. w., während Töne, deren Ausdrucke die Quadrate von 7, 11, 15, 19 u. s. w. entsprechen würden, nicht hervorgerufen werden können. — Was die Vertiefung gegenüber dem geraden Stabe betrifft, so ist dieselbe, wie dies aus der Vergleichung der Obertöne hervorgeht, fast verschwindend gering.

— Nicht das gleiche Verhalten zeigt sich, wenn wir den offenen Ring einseitig befestigen (Fig. 238).

Selbstverständlich rückt der Grundton noch weiter in die Tiefe, jedoch sowohl er wie seine Obertöne haben eine um eine kleine Terz höhere Tonlage als ein gleicher und in gleicher Weise befestigter gerader Stab. Dieses Verhalten liesse sich aus dem Umstande erklären, dass die Biegung des offenen Ringes bei dieser Befestigungsart als eine convergente anzusehen ist.

Die convergente Biegung nämlich bewirkt das Gegentheil der bisher betrachteten Krümmungen; sie erhöht den Grundton sowie seine Obertöne, und zwar sind diese Erhöhungen weit beträchtlicher, als bei den früheren Biegungsarten die Vertiefungen. — Denn, während die vertiefende Wirkung der Biegung (*b*) (Fig. 237) nur einen halben, und eine gleiche Biegung auch am anderen Stabende (*c*) ebenfalls nur einen weiteren halben Ton, daher zusammen einen ganzen Ton gegenüber dem geraden Stabe beträgt, bewirkt Biegung *g* eine Erhöhung um eine Quarte, welche durch die Biegung *h* noch um eine grosse Terz zunimmt, so dass die Gesammtdistanz vom Grundtone des geraden Stabes einer grossen Sexte gleichkommt. —

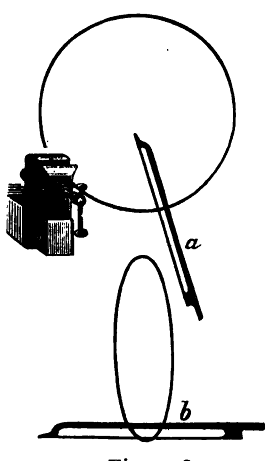
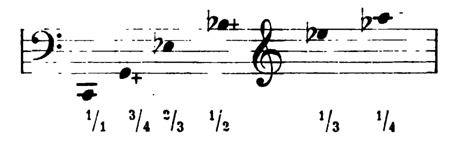


Fig. 238.

Dieser verschiedene Einfluss der Krümmungen auf die Tonhöhe haben Chladny das Mittel geboten, die Klangstäbe seines Claviercylinders und Euphons ohne Substanzverluste auf das genaueste zu stimmen.

Der Grund, warum convergente Biegungen den Ton erhöhen, beruht darin, dass der so stark gekrümmte Theil an den Schwingungen nicht mehr activ, sondern nur noch passiv theilnimmt. Er bildet gleichsam ein Gewicht, welches den schwingenden geraden Theil des Stabes im hemmenden Sinne beeinflusst. So würde im Falle *g* der um ein Viertel seiner Gesammtlänge verkürzte Stab ohne dieses Anhängsel im Verhältnisse zum Stabe von vier Viertel Länge (*a*) eine Tonerhöhung um nahezu eine kleine Terz erfahren und

selbstverständlich eine noch bedeutendere, wenn im Falle *h* der Stab auf die Hälfte von *a* verkürzt würde, wie aus nachstehenden, den Verkürzungen unseres Stabes um $^3/_4$, $^2/_3$, $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ entsprechenden Tonhöhen zu ersehen:



wobei die volle Uebereinstimmung von Breite und Dicke dieser Stäbe mit den diesfälligen Dimensionen von *a*, Fig. 237, vorausgesetzt ist. Noch sei bemerkt, dass die Töne des offenen Ringes, falls die Dimensionen des Stabes, aus welchem er geformt ist, hinsichtlich der Breite und Tiefe nicht allzu verschiedene sind, wenn man in der Ebene des Ringes, wie bei *a*, Fig. 238, streicht, schwerer ansprechen und höher sind, als wenn der Bogen senkrecht, wie bei *b*, Fig. 238, zur Ringebene geführt wird, was sich einfach aus der gewölbten Gestalt des Ringes und der hieraus folgenden, die Schwingungen erschwerenden Stemmung der Theilchen gegeneinander erklärt.

Aehnliche Verhältnisse der Schwingungszahlen lassen offene Dreiecke erkennen, die, unter ihrem lateinischen Namen »Triangel« bekannt, in der Orchestermusik Verwendung zu finden pflegen, wo sie durch Schlagen mittels eines Metallstiftes zum Tönen gebracht werden. Die enge Lage und bedeutende Kraft der durchaus unharmonischen Obertöne bewirken den eigenthümlichen, eine bestimmte Tonhöhe ausschliessenden Klang des Triangels.

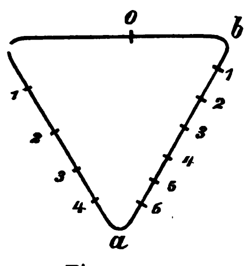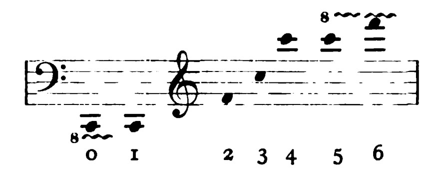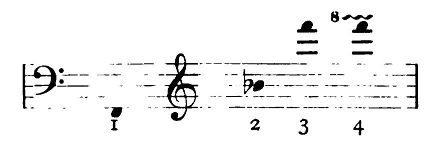


Fig. 239.

Versucht man dem Triangel durch Streichen mit dem Bogen Töne abzugewinnen, so muss man es an einer seiner Biegungen, sei es bei *a* (Fig. 239) oder bei *b* (das Ergebniss bleibt in beiden Fällen dasselbe), in einen Schraubstock fest einspannen. Wenn man rechtwinkelig zur Ebene, sei es innen oder aussen, die Bogenstriche führt, so wird man auf dem wagrechten Theile, gleichviel wo man streicht, nur einen Ton hervorrufen können und zwar den tiefsten. Wird der rechte Theil an den mit Ziffern bezeichneten Stellen gestrichen, so folgen der Reihe nach immer

höhere Töne, wie sie im folgenden Beispiele den Zahlen entsprechend dargestellt sind.

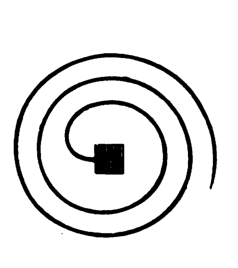


Der linke Theil liefert dagegen folgende Töne:



Beide Erscheinungen, nämlich: dass die Töne des linken Theiles höher sind, sowie dass ihre Zahl eine geringere ist, erklären sich aus der grösseren Gesammtlänge des rechten und des oberen Theiles, wodurch die tiefere Lage der Töne wie die grössere Zahl von Partialtönen bedingt wird.

Die Tonfolgen selbst aber entsprechen weder derjenigen von Stäben, noch von Gabeln oder offenen Ringen.



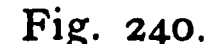


Fig. 240.

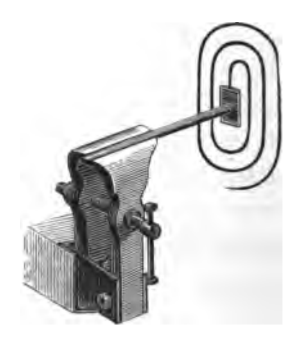


Fig. 241.

In ähnlicher Weise, wie mit dem Triangel, verhält es sich mit den für den Stundenschlag in Uhren dienenden sogenannten »Resonanzfedern« (Fig. 240), deren tiefer, glockenartiger Klang in der grossen Länge und Dünne des Drahtes beruht, wodurch das gleichzeitige Erklingen einer langen Reihe von Partialtönen aus dem durch

sie verstärkten Grundtone möglich wird. Um diese Obertöne einzeln gleichsam abzufiltriren, bedient man sich des Bogens, und der in Figur 241 angedeuteten Befestigungsart der Feder.

Dass aber die Zahl der Partialtöne in einem solchen Drahte, der im Hinblicke auf seine grosse Länge im Verhältnisse zu seiner geringen Dicke fast schon mehr Saite als Stab ist und die zum Tönen erforderliche Steifigkeit nur durch die Spiralform erlangt, nothwendig eine überaus grosse sein muss, ergibt sich aus theoretischer Erwägung und wird durch den Versuch bestätigt. Eine solche Feder, linear gestreckt, ist in der Tiefe vollständig tonlos, und nur ganz hohe Obertöne können hervorgerufen werden, wenn man die Feder in den Schraubstock fest einspannt und an passender Stelle mit dem Bogen streicht.

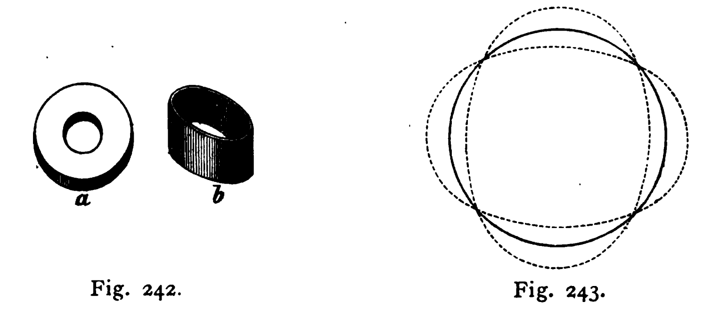


Fig. 242. Fig. 243.

Ein geschlossener Ring, d. h. ein in Kreisform gebogener, an seinen Enden zusammengelötheter Stab, schwingt in sehr einfacher und regelmässiger Weise, vorausgesetzt, dass der Stab, aus dem er geformt ist, einen kreisrunden oder quadratischen Querschnitt hat. Ist der Ring hingegen in der Richtung seiner Ebene oder senkrecht zu dieser breiter als in der anderen Dimension, so wird er im ersteren Falle eine durchlöcherte Scheibe *a* (Fig. 242), im zweiten das Segment einer Röhre *b* bilden und in seinen Schwingungen den für diese Körper geltenden Gesetzen folgen.

Ein geschlossener Ring (Fig. 243) kann nur in der Weise schwingen, dass eine gerade Anzahl gleicher Strecken sich in entgegengesetzter Bewegung befindet, und es leuchtet ein, dass vier die geringste Zahl von Knoten ist, die sich hiebei bilden müssen. Ungleich lange Strecken sind in einem durchwegs gleichartigen Ring-

system ausgeschlossen, weil die längere nicht in derselben Zeit eine Schwingung vollenden kann, wie die kürzere. Ebensowenig sind gleiche Abtheilungen in ungerader Zahl denkbar, denn zwei in gleicher Richtung schwingende Theile würden die entgegengesetzte Bewegung des dritten sofort vernichten. Die Zahl der schwingenden Strecken und Knoten nimmt bei jedem folgenden Partialtone um zwei zu. — Ein Ring wird also in 4, 6, 8, 10 u. s. w. Abtheilungen schwingen können. Allein die Töne steigen nicht im Verhältnisse dieser Zahlen, sondern in jenem der Quadrate der ungeraden Zahlen, von drei angefangen.

Geschlossene Ringe geben im Vergleiche mit offenen Ringen von ganz gleichen Dimensionen viel höhere Töne und eine weit beschränktere Reihe von Obertönen.

Die Tonfolgen senkrecht zur Ringebene gestrichener, geschlossener Ringe kommen mit jenen in gleicher Weise in Schwingung versetzter offener Ringe, jedoch erst vom zweiten Tone ab, überein.

Die Töne zweier Ringe aus demselben Stoffe verhalten sich wie ihre Dicke und umgekehrt wie die Quadrate ihrer Durchmesser. Demnach wird dem dickeren und kleineren Ringe die grössere Schwingungszahl zukommen.

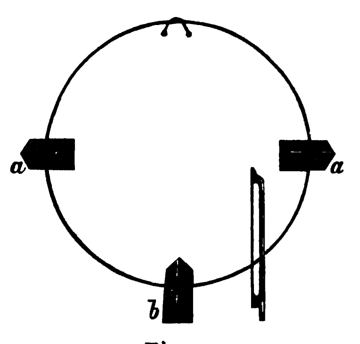


Fig. 244.

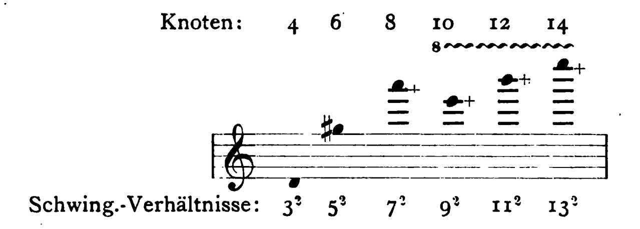
Endlich geben geschlossene Ringe ebenso, wie offene, höhere Töne, wenn sie in der Ebene, als wenn sie senkrecht zu ihr gestrichen werden. Dass die Töne schwerer zu Stande kommen, erklärt sich, wie dies schon gelegentlich der offenen Ringe ausgeführt wurde, aus der gewölbten Gestalt, wonach bei den Schwingungen nach innen Stemmungen und bei jenen nach aussen Dehnungen der Molecule eintreten müssen.

Behufs bequemer Ausführung einschlägiger Versuche mit geschlossenen Ringen bedient man sich zweckmässig der in Figur 213 angedeuteten Vorrichtung, mittels welcher man den Ring (Fig. 244) bei *a a* fixirt.

Die Knotenpunkte werden durch einen keilförmig geschnittenen Kork (*b*) unterstützt. Der Ring wird zwischen zwei dadurch abge-

grenzten Punkten mittels Bogenstriches oder Streichstäbchens tönen gemacht. Auf der anderen Hälfte des Ringes werden Drahtreiter zum Nachweise der Knotenpunkte aufgesetzt.

Schliessen wir mit einigen Versuchen. Unser aus rundem Messingdrahte von 6 Millimetern im Durchmesser verfertigter Ring misst in mittlerer Peripherie 588 Millimeter. Demnach beträgt $^1/_4$ desselben $= 147$, $^1/_6 = 98$, $^1/_8 = 73{\cdot}5$, $^1/_{10} = 58{\cdot}8$, $^1/_{12} = 49$, $^1/_{14} = 42$ Millimeter. Wird der Ring senkrecht zur Ebene gestrichen, so entsprechen diesen Abtheilungen folgende Tonhöhen.



Wir werden später bei den Glocken den gleichen Schwingungsverhältnissen wie jenen geschlossener Ringe begegnen und es steht nichts entgegen, den Ring als den abgelösten obersten Theil eines Glockenrandes anzusehen.

---

36. Vortrag.

(Stäbe. Longitudinal- und Torsionsschwingungen.)

Wir gelangen zu den Longitudinalschwingungen der Stäbe.

Erinnern wir uns, dass wir den Stab aus der Saite herleiteten, die wir im Verhältnisse zu ihrer Länge immer dicker werden liessen, bis sie vermöge ihrer eigenen Steifigkeit die vordem nur durch Spannung erlangte lineare Form nunmehr ohne diese anzunehmen und zu behalten geeignet wurde, und erinnern wir uns, dass wir der gespannten Saite durch spitzwinkeliges Streichen mit dem Bogen, oder durch Reiben mit einem beharzten Lappen in der Längsrichtung Töne entlockten, so liegt die Frage nahe, ob Stäbe nicht in gleicher Weise zum Tönen gebracht werden können.

Versuche haben uns bereits gelehrt und werden uns weiters lehren, dass dies unter gewissen Voraussetzungen bei jeder der drei Befestigungsarten, bei welchen man Stäbe in transversale Schwingungen versetzen kann, möglich ist.

Wir werden jedoch auch hier, wie bei den Transversalversuchen, finden, dass die, der Abgrenzungsart der Saite entsprechende doppelseitige Befestigung des Stabes der Hervorrufung longitudinaler Schwingungen sich um so ungünstiger erweist, je dicker und kürzer der Stab ist, und je starrer seine Enden festgehalten werden.

Um dies zu erklären, muss daran erinnert werden, dass Längsschwingungen durch Verlängerungen und Verkürzungen in linearer Richtung in Folge abwechselnden Aneinander- und Auseinanderdrängens der Molecule entstehen. — Je grösser nun das Hinderniss ist, das wir dieser Ausdehnung und Zusammenziehung des Stabes durch starre Befestigung seiner Enden bereiten, um so schwerer werden solche Stäbe in Schwingung gerathen. Die gebräuchliche Abgrenzung der Saite mittels zweier Stege darf als eine solche starre Befestigung nicht angesehen werden, da die Molecule der Saite ihre Verlängerung über die Grenze des Steges hinaus leicht bewirken, abgesehen davon, dass sie sich in der Längsrichtung leichter dehnen, als Stäbe.

Die Obertöne doppelt befestigter Stäbe befolgen das Gesetz der natürlichen Zahlen und zeigen dieselben Abtheilungen, wie die in gleicher Weise schwingenden Saiten. — Von den kleinen, sich hierbei ergebenden Abweichungen kann abgesehen werden.

Stäbe, die an einem Ende befestigt, am anderen aber frei sind, können am freien Ende keinen Knoten haben, weil hier weder Verdichtungen noch Verdünnungen stattfinden, was nur bei befestigten Stellen oder an Knotenpunkten erfolgen kann, wo Zusammendrückungen der Theilchen von beiden Seiten in gleichem Maasse erfolgen.

Wenn wir einen solchen Stab aus einem in der Mitte durchschnittenen, beiderseitig befestigten entstehen lassen (Fig. 245), so ergeben sich die Consequenzen von selbst, und wir erkennen sofort, dass die Obertöne eines solchen Stabes nur bei Abtheilungen entstehen können, die den ungeraden Zahlen entsprechen und in ihrem Verhältnisse vollkommen übereinstimmen mit den Knotenabtheilungen

gedeckter Pfeifen, wie mit der Lage der Bäuche, die an den Enden nur halbe sein können.

Der Eigenton eines einseitig befestigten Stabes wird vollständig übereinstimmen mit jenem eines beiderseits befestigten von doppelter Länge, oder was dasselbe ist, von zwei gleich langen Stäben, selbstverständlich desselben Stoffes, deren einer an beiden Enden, der andere nur an einem Ende befestigt ist, wird der letztere genau um

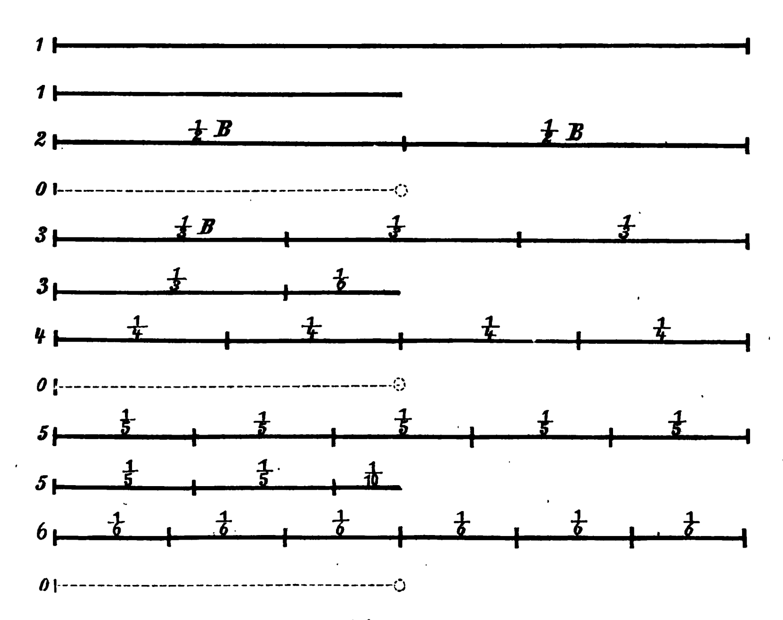


Fig. 245.

eine Octave tiefer klingen. Die Dicke der Stäbe hat, gleichwie die Spannung bei den Saiten, auf die Höhe des Longitudinaltones nahezu keinen Einfluss.

Denken wir uns einen beiderseits befestigten Stab in der Mitte getheilt und die umgewendeten Hälften so vereinigt, dass beide Befestigungspunkte zusammenfallen, so haben wir es mit einem beiderseits freien Stabe zu thun. — Ein solcher Stab wird, wenn in der Mitte festgehalten, seinen tiefsten Ton geben, und dieser mit dem eines beiderseits befestigten Stabes von gleicher Länge unisono klingen. —

Der Ton eines derart festgehaltenen freien Stabes wird also gleich dem beiderseitig befestigten um eine Octave höher sein, als wenn derselbe Stab an einem Ende befestigt ist, wie dies eben zuvor gezeigt wurde. —

Um die Obertöne eines beiderseitig freien Stabes hervorzurufen, muss er in einem der betreffenden Knotenpunkte festgehalten werden. Da an beiden Enden nur Schwingungsmaxima bestehen können, mithin halbe Schwingungsbäuche liegen, deren Summe der Wellenlänge des jeweiligen Obertones entspricht, so folgt daraus, dass ein solcher Stab, gleich wie die offene Pfeife, sowohl in solchen Abtheilungen, wo die Verdichtung, als auch in solchen schwingen kann, wo die Verdünnung in die Mitte des Stabes zu liegen kommt.

Dass ein Stab, gleichviel welchen Stoffes oder welcher Form, in longitudinale Schwingungen um so leichter gerathen muss, je weniger die Beweglichkeit seiner Enden gehemmt ist, leuchtet wohl ohneweiters ein und bedarf nicht erst eigener Versuche.

Die Querschnittsform eines Stabes gleichen Stoffes und gleicher Länge hat auf die Tonhöhe keinen Einfluss, wie die Versuche, die wir jetzt mit einer Röhre, mit einem breiten und mit einem schmalen Streifen gleicher Länge, sämmtlich aus Glas, weiters mit Stäben aus Tannenholz von kreisrundem, elliptischem, quadratischem, rechteckigem und dreieckigem Querschnitte vornehmen wollen, darthun werden. Auch bei grösserer oder geringerer Dimension des Querschnittes bleibt die Tonhöhe nahezu unverändert.

Dass in sich zurückkehrende Stäbe in Form von Ringen, Ellipsen oder eckigen Gebilden keine Longitudinalschwingungen vollführen können, ist leicht einzusehen. — Bei offenen Ringen oder eckigen Formen sind sie allerdings möglich, aber bisher nur hinsichtlich offener Ringe von Cauchy[1]) untersucht worden.

Aus seinen diesbezüglichen Untersuchungen ergab sich das merkwürdige Resultat, dass bei allmäliger Ueberführung eines geraden Stabes in die Kreisform der longitudinal geweckte Ton mit zunehmender Krümmung an Höhe gewinnt, also das entgegengesetzte Verhalten gebogener Stäbe zeigt, welche durch transversale Schwingungen zum Tönen gebracht werden.

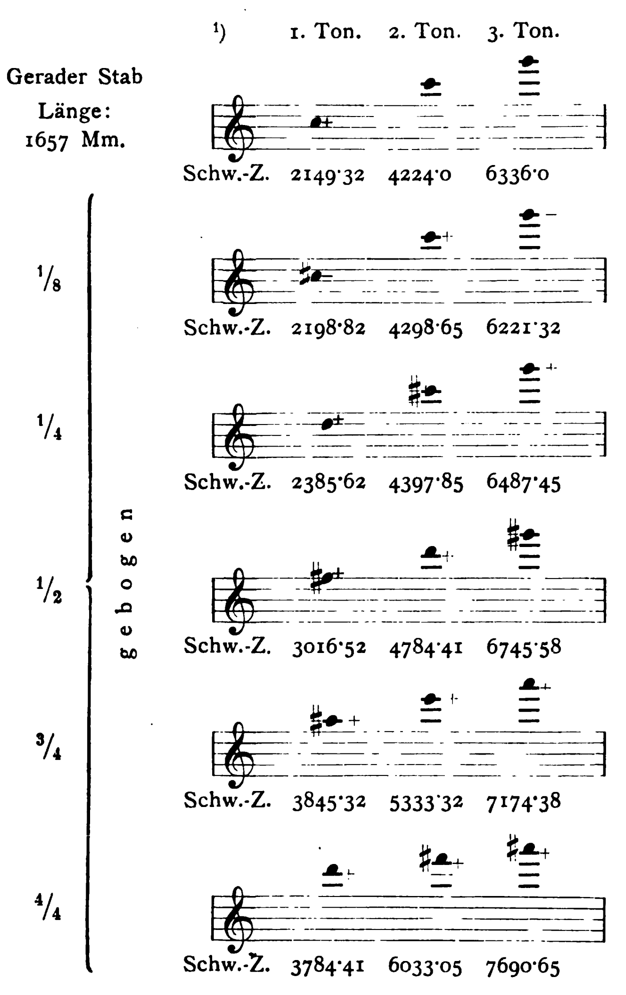
---

[1]) Exercises mathématiques III 328.

Die folgende, von Bindseil auf Grund der von Cauchy für die drei ersten Töne eines offenen Ringes ermittelten Formel:

$$N_1 = \sqrt{5}, \quad N_2 = \sqrt{8}, \quad N_3 = \sqrt{13},$$

und der hieraus für die Krümmungen von 1/8, 1/4, 1/2, 3/4 Umkreis gezogenen, theoretischen Folgerungen berechnete Uebersicht



lässt erkennen: dass der erste Ton (Grundton) mit zunehmender Krümmung des Stabes sich in immer grösseren Intervallen erhöht,

[1]) Alle Töne sind um eine Octave höher zu lesen.

während der zweite und noch mehr der dritte in immer kleineren Schritten den Erhöhungen des ersten Tones folgen.

So beträgt die Zunahme der Tonhöhe des ersten Tones bei vollends erlangter Kreisform des Stabes — gegenüber jenem des geraden Stabes — das Intervall einer grossen None, während die Zunahme des zweiten Tones sich auf eine übermässige Quarte und die des dritten Tones gar nur auf eine übermässige Secunde beschränkt.

Es ergibt sich hieraus, dass die Theiltöne eines longitudinal schwingenden, offenen Ringes unter allen, wie immer geformten, tönenden Körpern, sowie bei allen Schwingungsarten in die engste Lage zu ihrem Grundtone treten.

Von diesen Erscheinungen wollen wir uns durch einige Versuche überzeugen und hierauf auch einen Versuch entgegengesetzter Art vornehmen: um zu ermitteln, wie sich die Tonhöhe verhält, wenn wir dem Stabende eine convergente Krümmung geben, die, wie Ihnen erinnerlich, bei transversaler Schwingung eine Erhöhung des Tones zur Folge hat. Unser Versuch zeigt nun, dass hier nicht das Gegentheil dessen stattfindet, was die gleiche Biegungsart bei transversal schwingenden Stäben bewirkt. Bei diesen tritt bei kreisförmiger Biegung bekanntlich die Vertiefung, bei convergenter dagegen die Erhöhung ein. Hier aber, wo die kreisförmige Biegung die Erhöhung des Tones zur Folge hat, tritt bei convergenter Krümmung nicht das Gegentheil, d. h. eine Vertiefung, sondern eine weitere Erhöhung des Tones ein, die jedoch bei weitem weniger beträgt, als bei fortgesetzter regulärer Ueberführung des Stabes in die Kreisform.

Geben wir beispielsweise der Biegung des Stabes die Form eines Viertelkreises, so beträgt die Erhöhung gegenüber dem Grundtone des geraden Stabes einen ganzen Ton. Biegen wir nun dieses Vierttheil der Stablänge immer convergenter, bis es die Form eines nahezu geschlossenen Kreises erlangt, so beträgt die Erhöhung kaum einen halben Ton, und diese Tönhöhe ändert sich auch nicht merklich, wenn wir den Kreis zur Spirale von etwa einem halben Umgang gestalten.

Die Längsschwingungen der Stäbe finden in der Musik keine Verwendung, sowohl, weil sie, um nur einigermassen tiefe Töne

hervorzubringen, sehr grosse Längen haben müssten, als auch, weil — abgesehen von der Unbequemlichkeit und Schwierigkeit, welchen die Hervorrufung, die Continuität und Dynamik des Tones begegnen — der Klang solcherart erzeugter Töne, wie Sie sich sogleich durch Reibung dieser vier Stäbe (Fig. 246) selbst überzeugen können, kaum zu den angenehmen zählt. Die diesfalls gemachten wenigen Versuche können vom musikalischen Gesichtspunkte aus wohl nur als Spielereien angesehen werden.

Um so grösser ist hingegen die Bedeutung, welche die Längsschwingungen der Stäbe für die Akustik haben, da sie sich in noch weiterem Umfange, als die Longitudinalschwingungen der Saiten, zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien eignen; denn wir können keine Saiten, wohl aber Stäbe aus Glas, Holz, gebrannten Erden, Gesteinen, dann Röhren, ebenfalls aus diesen Stoffen, wie aus Metallen und in allen Querschnitten erzeugen.



a Eichen-, a_1 Tannenstab, *b* Messingrohr, *c* Glasstab.

Fig. 246.

Eine Methode, solche Bestimmungen auszuführen, haben wir in der Kundt'schen bereits kennen gelernt. Mit einer einfacheren wollen wir uns jetzt bekannt machen. Zu diesem Verfahren, welches die Anwendung eines Tonmessers bedingt (der übrigens durch jedes andere stimmbare, normaltönige, gut gestimmte Instrument — allerdings nothdürftig — ersetzt werden kann), wird am zweckmässigsten der Grundton des beiderseits freien Stabes benützt, der, gleich jenem einer offenen Pfeife, einer einfachen Welle entspricht, da beide einen Knoten in der Mitte und zwei halbe Bäuche an den Enden haben.

Der Vergleich des Longitudinaltones mit einem Sonometer ergibt dessen Schwingungszahl (n), die, mit der Länge des Stabes (l) multiplicirt, die relative Geschwindigkeit (x) der Fortpflanzung des Schalles, verglichen mit jener in der Luft, oder in einem anderen festen oder gasförmigen Stoffe ergibt; daher

$$x = n \times l.$$

Stellen wir mit unseren fünf gleich dicken Stäben aus Tannen-, Eichenholz, Glas, Eisen und Messing, deren jeder genau 1985 Mm. (l) lang ist, Versuche an, so finden wir deren Grundtöne, beziehungsweise Schwingungszahlen (n), und zwar:

des	Tannenstabes	fis^{3-} [1])	= 2901
»	Eisenstabes	e^3	= 2607
»	Glasstabes	e^{3-}	= 2570
»	Eichenstabes	d^{3+}	= 2340
»	Messingstabes	b^{2-}	= 1827

woraus sich nach der obigen Formel die Fortpflanzungsgeschwindigkeit (x)

im	Tannenholze	mit	5758·4	Meter
»	Eisen	»	5174·9	»
»	Glase	»	5101·4	»
»	Eichenholze	»	4701·2	»
»	Messing	»	3627·0	»

ergibt.

Dividiren wir diese Producte durch die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft ($v = 340$ Meter), so finden wir, dass der Schall

das	Tannenholz	16·94 mal	
»	Eisen	15·22 mal	
»	Glas	15·— mal	
»	Eichenholz	13·82 mal	und
»	Messing	10·65 mal	

schneller durchlauft als die Luft, und im Tannenholze

1·11 mal	schneller	als	im	Eisen
1·13 mal	»	»	»	Glase
1·24 mal	»	»	»	Eichenholze und
1·58 mal	»	»	»	Messing

fortkommt.

[1]) Die Schwingungszahlen von Tönen, die mit dem Vergleichsinstrumente nicht übereinstimmen, findet man durch Stösse stimmbarer Gabeln, Zungen oder Pfeifen. Bedient man sich letzterer, so ist Gleichheit des Windes Grundbedingung zur Erlangung verlässlicher Resultate.

Dass, wenn man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für einen Stoff kennt, die Schwingungszahl des hervorgerufenen Tones sich durch einfache Rechnung $\left(n = \frac{x}{l}\right)$ ermitteln lässt, bedarf wohl nicht erst der Bemerkung.

Es erübrigt noch die Frage, ob durch die longitudinale Erregung draht- und stabförmiger Körper nicht zugleich auch transversale Schwingungen eingeleitet werden[1]), so zwar, dass beide Schwingungsarten gleichzeitig bestehen, eine Frage, zu der man durch Erscheinungen gelangt, die sich eben nur auf diese Weise erklären lassen.

Dass dem in der That so ist, lässt sich auf mehrfache Art nachweisen.

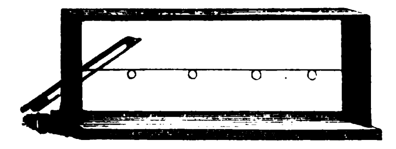


Fig. 247.

So werden, wenn wir ein zwischen zwei dünnen Brettchen gespanntes Pferdehaar (Fig. 247), welches einige leichte Ringe aus Pferdehaar oder Papier trägt, longitudinal erregen, indem wir eines dieser Brettchen in der Ebene seiner schmalen Seite mit dem Bogen streichen, die Ringe zu den Knotenpunkten wandern und dort verharren. Drehen wir den Apparat um 180^0, so dass die Ringe nun auf der entgegengesetzten Seite des Haares ruhen und markiren wir diese Punkte in irgend einer Weise (etwa durch in dem Fussgestelle angebrachte Stäbchen), so werden die Ringe bei neuerlichem Bogenstriche ihre Stellung verlassen und zu Punkten hinwandern, die genau zwischen je zwei der früher innegehabten Stellungen liegen.

Bedingung des Eintretens dieser Erscheinung ist, dass die Zahl der, einer der transversalen Schwingungsabtheilungen zukommenden Schwingungen mit jener der longitudinalen Schwingungen im Einklange steht.

---

[1]) Eine solche Folgewirkung ergibt sich — selbstverständlich in entgegengesetzter Weise — bei Transversalschwingungen, durch welche in Folge der Dehnung und Zusammenziehung der Theilchen Längsschwingungen hervorgerufen werden.

Eine noch präcisere Darlegung dieses Vorganges erhält man, wenn man einen rechteckigen Stab derart unterstützt, dass er seinen zweiten Longitudinalton gibt.

Versetzt man ihn in Längsschwingung, nachdem er mit etwas Sand bestreut wurde, so zeigt sich, dass sich letzterer in eine weit grössere Menge von Abtheilungen ordnet, als es nach der Zahl der vorhandenen Longitudinalknotenpunkte der Fall sein sollte. Markirt man diese Abtheilungen und dreht den Stab auf die entgegengesetzte Seite, so dass die Unterfläche zur Oberfläche wird, so findet man, dass bei gleicher Befestigung und Erregung sich der Sand zwischen je zwei der markirten Linien anhäuft. — Da hiernach zwischen zwei Knoten der Unterfläche je ein Knoten der Oberfläche, oder umgekehrt sich befindet, so muss diese Erscheinung nothwendig von transversalen Schwingungen herrühren, auf welchen Factor auch die zuvor an dem Pferdehaare beobachtete Erscheinung zurückzuführen ist.

Die Richtigkeit dieser Anschauung wird durch den Umstand bestätigt, dass der, der Zahl von schwingenden Abtheilungen entsprechende Transversalton des Stabes mit dessen Longitudinaltone übereinkommt. In letzter Auflösung dürfte sich diese Erscheinung als Folge der Resonanzwirkung herausstellen.

Das Zustandekommen dieser Anhäufungen erfolgt dadurch, dass der Sand von den Schwingungsbäuchen abgeworfen wird, in den Knotenpunkten aber liegen bleibt. —

Noch anschaulicher, als mit diesem zur Demonstration weniger geeigneten Experimente, lässt sich die Coëxistenz der beiden Schwingungsarten in folgender Weise darstellig machen.

Wenn wir einen sägeförmig und konisch geschnittenen Kork in eine Glasröhre (Fig. 248) einführen oder ihn in Gestalt eines Reiters auf die Röhre aufsetzen (welche in letzterem Falle auch aus einem, durch einen anderen, longitudinal erregbaren Stoff hergestellten stab- oder saitenförmigen Körper bestehen kann) und die Röhre vom Ende gegen die Mitte zu oder umgekehrt durch Reibung in Längsschwingungen versetzen, so wird der Kork in der einem Knotenpunkte zugekehrten oder von ihm abgewandten Richtung wandern, je nachdem der Kork mit dem breiten oder mit dem schmalen Ende eingeführt oder aufgesetzt wurde. Wir können demnach, wenn wir mit beiden Korken gleichzeitig experimentiren, je nach der Art, wie wir diese Korke

einführen, beziehungsweise aufsetzen, dieselben von- oder gegeneinander wandern machen.

Würde die Röhre blos in longitudinaler Richtung schwingen, so könnte der Kork nur die hin- und heroscillirende Bewegung mitmachen, aber nicht weiter rücken. Dieses Letztere bewirken die gleichzeitig auftretenden transversalen Erschütterungen.

Den Vorgang selbst haben wir uns folgendermassen vorzustellen. Wenn wir voraussetzen, dass das Tempo des wagrechten Hin- und Herganges der Molecule bei longitudinaler Schwingung mit jenem der senkrecht erfolgenden Transversalschwingungen übereinkommt (wie dies durch die vorerwähnten Sandanhäufungen bewiesen ist), und wenn wir weiters annehmen, dass die Bewegung einer Longitudinal-

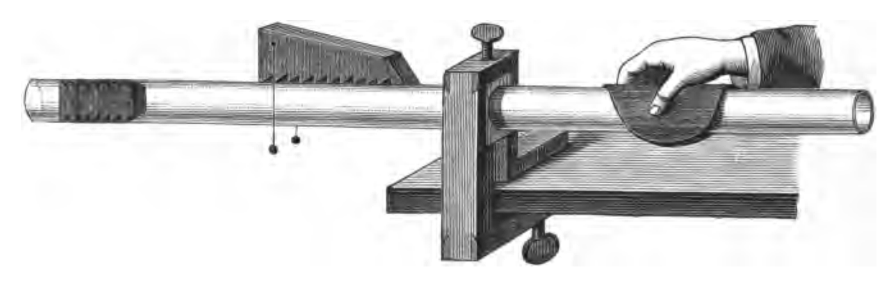


Fig. 248.

schwingung in der Längsrichtung, d. h. vom Ende des Stabes gegen die Mitte und umgekehrt erfolgt, während jene der Querschwingung nach aufwärts und abwärts gerichtet ist, so leuchtet ein, dass der von dieser Querschwingung in die Höhe geschleuderte Kork bei seinem Zurückfallen immer nur von einer gleichgerichteten Längsschwingung erfasst und weiter geschoben wird, weil die entgegengesetzte Schwingung während des Momentes erfolgt, als der emporgeschleuderte Kork die Unterlage verlassen hat, welche daher auf den Kork keine Wirkung äussern kann. Dass der Kork die Knoten der Transversalschwingungen überwindet und bis zum Longitudinalknoten, oder von diesem weg bis an das Ende des Stabes unaufgehalten fortrückt, liegt an der Länge des Korkes, der in jeder Lage beim Zurückfallen stets auf einen Theil der Längsschwingung trifft und von dieser ergriffen und weitergeführt wird. — Dass die Wanderungen des Kork- wie des Drahtreiters auf Saiten, wie wir

dies im 24. Vortrage erfahren, ebenfalls auf diesem Grunde beruht, unterliegt wohl keinem Zweifel.

Ausser den bis jetzt betrachteten beiden Schwingungsarten können Stäbe und folgerichtig auch Saiten noch eine dritte Art Schwingungen ausführen, nämlich sogenannte Torsions- (d. h. drehende) Schwingungen. Eine Vorstellung dieser Bewegungen bieten die häufig angewendeten selbstthätigen Thürschliesser, eine Stahlstange, die mit einem Ende am Thürfutter, mit dem anderen an dem Thürflügel selbst befestigt, bei Oeffnung des letzteren gewaltsam um ihre Längsaxe gedreht wird.

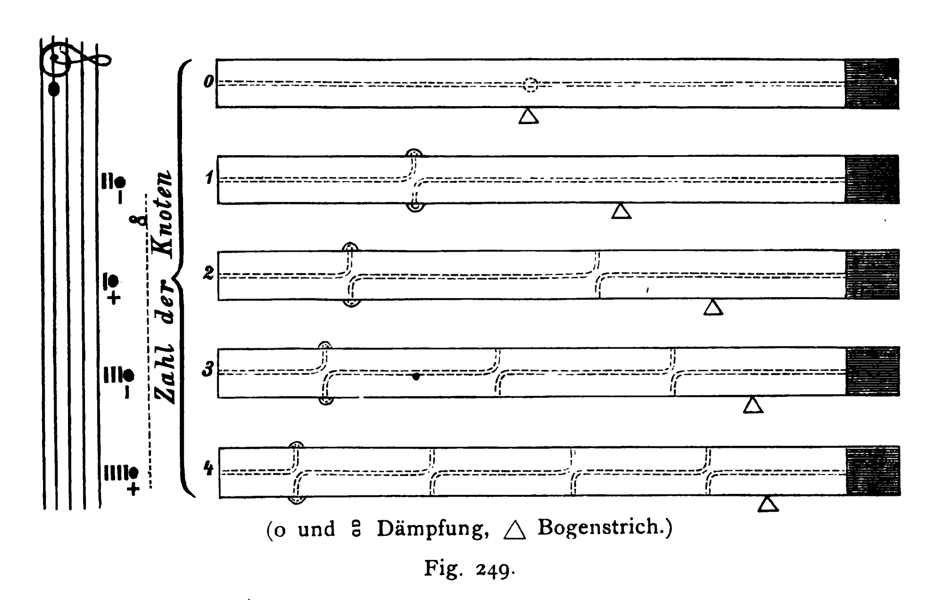
Auch eine freihängende beschwerte Drahtspirale (Fig. 12), deren Sie sich vom 2. Vortrage her noch erinnern dürften, versinnlicht die Torsionsschwingung.

An runden Stäben lassen sich Grundton wie Obertöne in gleicher Weise wie Longitudinaltöne hervorrufen, nur muss man den Stab, statt ihn der Länge nach zu reiben, an einem Ende mittels hin- und herdrehender Bewegung in Schwingung versetzen, im Falle es sich um einen beiderseits freien Stab handelt, der auch bei dieser Schwingungsart am leichtesten zur Ansprache zu bringen ist, wie solches Ihnen am Schlusse des 14. Vortrages (Fig. 120) gezeigt wurde. Die Aufeinanderfolge der Intervalle ist dieselbe, wie bei der Longitudinalerregung in jeder der drei verschiedenen Befestigungsarten, und klingen die Töne eines einseitig befestigten Stabes um eine Octave tiefer. Ueberhaupt aber ist der Torsionston gegenüber dem Longitudinaltone derselben Ordnungszahl beträchtlich tiefer, so der:

einer	Glasröhre	um eine kleine Sexte,
»	Messingröhre	
»	Eisenröhre	
»	Stahlsaite	» eine grosse Sexte,
eines	Eichenstabes	» zwei Octaven,
»	Tannenstabes	» » » und eine kleine Terz.

Torsionstöne rechteckiger Stäbe können nur mittels Bogenstriches hervorgerufen werden, und sprechen dann am leichtesten an wenn sie an einem Ende, mit der Breitseite nach oben, befestigt und an einer Längskante gestrichen werden. Wird die Oberfläche mit Sand bestreut, so treten die den Schwingungsabtheilungen entsprechenden Knotenpunkte an denselben Stellen wie bei Transversal-

schwingungen auf; zugleich aber zeigt sich als charakteristische Erscheinung allemal eine genau in der Mitte des Stabes verlaufende Linie, die sich leicht erklären lässt, wenn man erwägt, dass in Folge der Torsionsbewegung die Kanten in der vollen Länge der Oberfläche abwechselnd auf- und abschwanken, wodurch der Sand von beiden Seiten gegen die in der Längsrichtung unbeweglich verharrende Mitte geschüttelt wird. — Die Töne, welche leicht ansprechen, wenn man das Lineal an der äussersten Knotenlinie mit Daumen und Zeigefinger hält (dämpft) und den Bogenstrich zwischen der Befestigung und der nächsten Knotenlinie in angedeuteter Weise führt.



(o und 8 Dämpfung, △ Bogenstrich.)

Fig. 249.

Die Aufeinanderfolge der Töne entspricht den ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7 u. s. w.

Mit dem 474 Millimeter langen, 30 Millimeter breiten, 3 Millimeter dicken und auf die Länge von 35 Millimeter von einem starken Schraubstocke in horizontaler Lage festgehaltenen Lineale, dessen wir uns im 32. Vortrage zur Darstellung der transversalen Schwingung bedient hatten (Fig. 210), erhalten wir nachstehende Tonfolge: g^1, d^3-, h^3+, f^4-, a^4+ (Fig. 249).

Breite und nicht zu dünne Ringe, auf Korkunterlagen passend gestrichen, zeigen, mit Sand bestreut, eine ähnliche Schwingungsart,

indem sich der Sand in der Mitte der Ringbreite zu einem Kreise ordnet.

In welchem Grade diese Schwingungsart bei einer mittels des Bogens in Transversalschwingung versetzten Saite, hervorgerufen durch die Zerrung, welche die Friction der in Folge des Colophoniums an der Saite haftenden Haare erzeugt, auftritt, und welchen (offenbar nicht günstigen) Einfluss diese Schwingungen auf die Klangfarbe äussern, ist noch wenig erforscht. Dass sich Torsionstöne, welcher Art immer, zu musikalischen Zwecken in keiner Weise eignen, braucht wohl nicht erst bewiesen zu werden.

37. Vortrag.[1])

(Flächen, ebene. — Platten. — Klangfiguren.)

Lassen wir einen Stab an Breite zunehmen, so wird er zur Platte, die wir dann auf eine beliebige regelmässige oder unregelmässige Art begrenzen können, so als Dreieck, als Quadrat, als Parallelogramm, als irgend ein Polygon, als kreisförmige oder elliptische Scheibe. Platten von ganz regelloser Gestalt lassen sich auf ihre Schwingungen zwar ebenfalls untersuchen, doch werden wir uns mit solchen Formen nicht weiter befassen.

Wir können der Platte durch allmälige Vertiefung ihrer Ebene verschiedene Gestalten geben und sie so zum Teller, zur Schale, zum Trichter, zur Glocke, endlich zum cylindrischen Gefässe formen.

In Ansehung des Stoffes lassen sich die Platten nicht nur, wie die Stäbe, aus Metallen, Glas, gebrannten Erden, Steinen, Gyps und Holz, sondern auch aus anderen starren Körpern, wie Hartgummi und Pappe, erzeugen.

Befassen wir uns vorerst mit ebenflächigen Platten.

Von diesen werden in der praktischen Musik nur Scheiben aus sogenanntem Glockengut (Hartmessing) verwendet. Es sind dies die

[1]) Die textlich geringe Ausdehnung dieses Vortrages ist durch die Gelegenheit, viel zu experimentiren, geboten. Wird wenig experimentirt, so kann dieser Vortrag mit dem folgenden in Einen zusammengezogen werden.

bekannten und hauptsächlich in der Militärmusik gebräuchlichen Becken (Cinellen), die entweder durch rasches Aneinanderschlagen, oder gleich dem, trotz seiner aufgebogenen Ränder ebenfalls hieher gehörigen Tamtam mittels eines harten oder gepolsterten Schlägels zum Tönen gebracht werden. In dieser Art erregt, bildet der Klang solcher Platten ein Geschwirre zahlloser durcheinander klirrender Töne ohne bestimmte Höhe und von scharf durchdringendem, explosivem Charakter; desshalb erscheinen solche Klangkörper bei derartiger Behandlung nur geeignet, den Rhythmus zu markiren, oder zur Hervorbringung gewisser symbolisch-decorativer Effecte zu dienen.

Eine andere, minder rohe Art, die Platte zum Tönen zu bringen, von der sogleich die Rede sein wird, lässt sich wegen der Complicirtheit des Vorganges wie auch wegen der geringen Stärke, Dauer und Modificationsfähigkeit des hiebei erzielten Klanges musikalisch nicht verwerthen. Um so wichtiger ist sie dagegen, um die Schwingungsart plattenförmiger Körper kennen zu lernen.

Zum Studium dieser von Chladny entdeckten Schwingungen können Platten von allen vorgenannten Begrenzungen und Stoffen verwendet werden. Die Erscheinungen, die sich hierbei ergeben, sind so mannigfaltig, dass man dieses Studium, abgesehen von seiner mathematischen Seite, schon vom Standpunkte des Experimentators allein als ein schier unerschöpfliches bezeichnen darf, was man sofort erkennt, sobald man wahrnimmt, wie unglaublich vieler Schwingungsarten eine einzige Platte bei einer und derselben Befestigungsart fähig ist, und dass diese letztere wieder in verschiedenster Weise abgeändert werden kann, deren jede abermals eine ganze Reihe neuer Erscheinungen darbietet.

Für unsere Zwecke wird es genügen, die Schwingungen quadratischer und kreisrunder Platten aus Messing und Glas bei centraler und bezüglich der runden auch bei excentrischer Befestigung kennen zu lernen.

Um diese Schwingungen hervorzurufen, bedient man sich bei befestigten Platten des Bogens, während bei lose aufruhenden (etwa auf Füsschen aus hartem Clavierfilz oder Kork) das Streichstäbchen bequemere Dienste leistet. Von der Streichart oder von dem Punkte, wo das Streichstäbchen aufgesetzt wird, sowie von dem Orte, an welchem mit einem oder mehreren Fingern die Knotenpunkte unter-

stützt werden, welcher Vorgang Dämpfung genannt zu werden pflegt — von allen diesen Momenten hängt die Hervorrufung einer bestimmten Schwingungsart ab, welcher jedesmal nicht nur ein bestimmter Ton entspricht, sondern auch eine ebenso bestimmte, aus Linien zusammengesetzte geometrische Figur, zu welcher sich Sand, auf die Platte gestreut, beim Ertönen dieser wie durch Zauber augenblicklich ordnet [1]). Dass diese sogenannten Chladny'schen Klangfiguren dadurch entstehen, dass der Sand von den vibrirenden Partien abgeworfen wird, auf den Knotenlinien aber liegen bleibt, leuchtet ein. Ebenso folgt aus einfacher Ueberlegung, dass symmetrische Figuren, selbstverständlich auf regulären Flächen, nur dann entstehen können, wenn diese in ihrem Mittelpunkte befestigt sind, was jedoch nicht ausschliesst, dass auch auf solchen Flächen unsymmetrische Figuren erscheinen können.

Die Sandfiguren runder Scheiben setzen sich je nach der Befestigungs- und Erregungsart aus Sectoren oder Kreisen zusammen. [2]) Diese Grundformen können aber auch in mannigfacher Art gemengt zugleich vorkommen. Auf Platten von quadratischer Gestalt, die unter allen Begrenzungsarten diejenige ist, deren Figuren sich durch die grösste Mannigfaltigkeit auszeichnen, bilden mit dem Rande parallele oder diagonale Linien, die Grundformen der Klangzeichen. Alle diese Linien, wenn sie auch scheinbar gerade verlaufen oder sich kreuzen, gehören stets gekrümmten, meist parabolischen Systemen an, die sich nie schneiden (Fig. 250), wie dies auch bei den Sandlinien der Torsionsobertöne der Fall ist. [3])

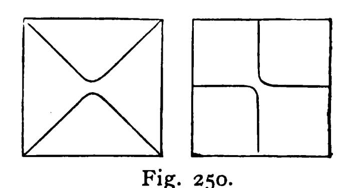


Fig. 250.

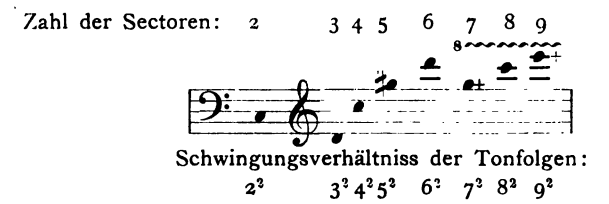
Alle in Platten, von welcher Configuration und bei welcher Befestigungsart immer, auftretenden Intervalle sind nicht nur unharmonisch zum Grundtone, sondern sie folgen auch keinen bestimmten Gesetzen, ausgenommen bei centraler Befestigung. In diesem Falle wachsen die Töne runder Scheiben mit der Zahl der Sectoren

[1]) In der Beilage X findet sich eine ausführliche Anleitung zur Darstellung Chladny'scher Klangfiguren.

[2]) Um letztere zu erhalten, muss die Scheibe gross und dünn sein.

[3]) Man vergleiche Figur 249 im 36. Vortrage.

(Durchmesserlinien) und verhalten sich wie die Quadrate der natürlichen Zahlen (2^2, 3^2, 4^2, 5^2 u. s. w.), wie solches in dem folgenden Beispiele, in welchem *C* als Grundton angenommen ist, dargestellt erscheint.



Es kommen demnach die Tonfolgen mit den Quadraten der Sectoren[1]) überein.

Die Ermittelung des Zahlengesetzes hingegen, welchem die Töne quadratischer[2]) Platten folgen, bildet noch heute eine zum Theile ungelöste Aufgabe für Mathematiker. Bisher ist ein solches Gesetz annähernd nur für die Tonfolge solcher Figuren ermittelt worden, deren Knotenlinien blos in einer Richtung verlaufen, mithin nach Chladny's Bezeichnungsart der Formel 2|o, 3 o, 4|o .... n|o entsprechen. Und selbst da ergeben sich bei Scheiben von gleichem Grundtone, wie solches sich bei Vergleichung der Resultate unserer Platte *A* mit jener der Chladny'schen *B* (siehe Notenbeispiel zur Beilage X) herausstellt, Verschiedenheiten, die nicht in den Unterschieden der Grundstimmung beruhen können, da die Abweichungen, wie die auffallenden zwischen 3 o = *es*¹ und 3|o = *cis*¹+, hiefür viel zu gross sind. Auf diese Verschiedenheit, die ihren Grund in den Verhältnissen zwischen Grösse und Dicke der Platten haben dürfte, hat schon Chladny in seinen »Neuen Beiträgen zur Akustik 1817« Seite 14 hingewiesen. Aus der centralen Befestigung der Platte, wie es bei unserer der Fall ist, lassen sich diese Differenzen nicht ableiten, denn sonst könnte irgend eine Uebereinstimmung beider Versuchsreihen weder in Bezug auf die Linienverhältnisse, noch auf die Tonhöhen stattfinden, was jedoch nicht der Fall ist, wie solches

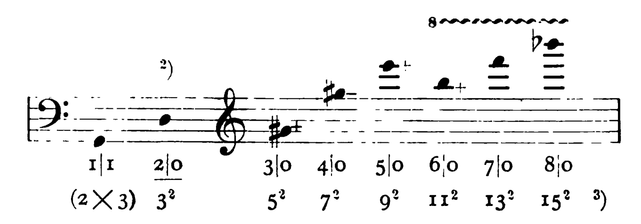
---

[1]) Man vergleiche die Figuren 37 bis 46 der Beilage X. Die Töne erscheinen daselbst um eine Quarte tiefer, entsprechend den Ergebnissen der Versuchsscheibe. Im vorstehenden Beispiele sind sie nach *C* transponirt.

[2]) Auch recht-, drei- oder mehreckige, sowie halbrunde und elliptische Scheiben sind von Chladny untersucht worden, die jedoch in Anbetracht ihrer minderen typischen Bedeutung hier nicht weiter in Betracht kommen.

die Coincidenz der Figuren und Tonhöhen von 1|1, 2|0 [1]), 2|1, 3|1, 3|1, 4|0, 3|3, 4|2, 5|0, 5|1, 4|3, 5|3, 6|5, 5|4, 6|3, 7|0, 5|5, 6|4, 8|2, 8|2, 7|5 beweisen.

Die Tonfolgen der Reihen n|o kommen bei Chladny mit den Quadraten der ungeraden Zahlen überein. In unsererer Reihe überschreitet der Ton 3 0 das Quadrat von 5 um beiläufig 98 Schwingungen (*es* = 615 — *cis*¹ = 517). Der Grundton 1|1 entspricht keiner Quadratzahl, sondern dem Producte von 2 × 3. Auf diese Grundzahl (6) transponirt, stellt sich das Beispiel in Noten folgendermassen dar:



Dem Grundtone einer Platte entspricht nur die einfachste Klangfigur; mit der zunehmenden Zahl der Obertöne werden die Figuren gleicherweise complicirter. Auf einer und derselben Platte lassen sich Figuren in überraschender Menge hervorrufen, denn die höheren Obertöne liegen so nahe beisammen, dass innerhalb des Intervalles eines Halbtones mehrere Figuren entstehen können, deren bezügliche Tonhöhen oft um nur wenige Schwingungen von einander abweichen. Daher kommt es, dass scheinbar bei einem und demselben Tone mehrere Figuren auftreten, während in Wirklichkeit jeder Schwingungszahl ihre specifische Figur und keine andere entspricht, oder, was dasselbe besagt, bei einer und derselben Figur einer und derselben Platte immer der gleiche Ton erscheint.

Dieses Verhältniss und die relative Tonfolge bleiben unverändert, wie verschieden auch der Flächeninhalt oder die Dicke der Platte sein mag.

---

[1]) Die Querstriche unter und über zwei gleichen Bezeichnungen zeigen an, dass die Schwingungszahl im ersteren Falle kleiner ist als im zweiten.

[2]) Nach Chladny.

[3]) Es empfiehlt sich, alle diese Resultate durch Vergleichung mit der Tabelle der Obertöne (Beilage XI *A*) zu prüfen.

Was nun die absolute Tonhöhe anbelangt, so geben Platten wie Scheiben von grösserem Durchmesser tiefere Töne, deren Höhe sich umgekehrt verhält, wie die betreffenden Flächengrössen, so dass eine halb so grosse Platte oder Scheibe um eine Octave höher klingt, als eine noch einmal so grosse. Andererseits geben gleich grosse Platten wie Scheiben, je dicker sie werden, um so höhere Töne, und zwar erhöht die Verdoppelung der Dicke den Ton um eine Octave.

Auch hier wiederholt sich das Gesetz, dass mit der Zunahme einer Dimension die tieferen Töne schwerer ansprechen, während die Reihe der leicht ansprechenden, höheren wächst.

Ueber die Schwingungszustände der einzelnen, durch die Knotenlinien getrennten Felder einer Platte erlangt man den Aufschluss durch Anwendung einer sogenannten Interferenzröhre, das ist eine Röhre, die nach unten in zwei gleich lange Aeste ausläuft und nach oben in einen breiteren, mit einer dünnen Papiermembrane bespannten, runden oder quadratischen Hohlraum mündet (Fig. 251). Bestreuen wir die Membrane mit etwas Sand und stellen wir die Aeste so, dass sie über zwei angrenzende Felder zu stehen kommen, so wird der Sand unbewegt bleiben, während er bei der Stellung der Aeste über gegenüberliegenden Feldern in heftige Bewegung geräth und sich alsbald zu einer Figur ordnet, die von der jeweiligen Tonhöhe des Plattentones abhängt. Wir können daraus füglich keinen anderen Schluss ziehen, als dass sich die angrenzenden Theile in einem entgegengesetzten Schwingungszustande befinden, so dass die Impulse abwechselnd immer nur bei einem Aste eintreten, aber auch sogleich beim anderen austreten, und daher gar nicht bis zur Membrane gelangen, während gegenüberliegende Schwingungsfelder gleichzeitig ihre Impulse in gleicher Richtung entsenden, die nothwendig bis zur Membrane vordringen und auf diese ihre Stosswirkung äussern müssen. Dass, wenn die Aeste über Sandlinien sich befinden, eine

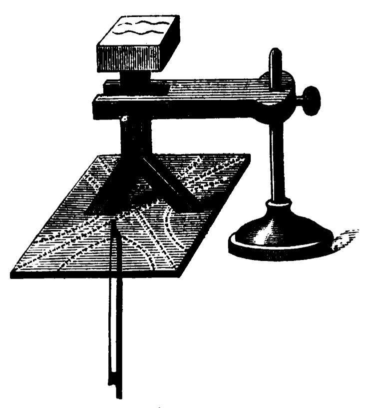


Fig. 251.

Bewegung auf der Membrane nicht stattfinden kann, bedarf keiner weiteren Erklärung. —

Die interferirende Wirkung der entgegengesetzten Schwingungsbewegung angrenzender Felder äussert sich selbstverständlich auch durch Schwächung der Klangstärke, wovon man sich leicht überzeugt, wenn man ein solches Feld mit der Hand oder sonstwie oberflächlich (ohne es zu berühren) bedeckt, da in diesem Falle der Klang auffallend zunimmt. Hin- und hergehende solche Bedeckungen bewirken förmliche Tonanschwellungen in einem mit der Bewegung genau übereinkommenden Tempo. Eine gleiche Veränderung der Tonstärke erfolgt, wenn man einen Ast der Interferenzröhre, die über gegenüberstehenden Feldern sich befindet, während des Tönens der Platte schliesst.

Wie der Sand die Linien der geringsten Bewegung erkennen lässt, so lassen sich die Stellen der stärksten Vibration durch das Aufstreuen eines leichten Pulvers nachweisen.



Fig. 252.

Es zeigt sich, dass dasselbe an solchen Stellen beim Ertönen der Platte heftig aufwirbelt und sich beim Verklingen des Tones zu eigenthümlichen Anhäufungen ordnet. Auf grossen Platten werden an solchen Stellen auch kleine Schnitzelchen eines feinen Goldschläger- oder Collodiumhäutchens in die Luft geschleudert und über der Platte schwebend erhalten. Bei runden Platten tritt noch die interessante Erscheinung hinzu, dass, wenn man die Platte blos mit leichtem Pulver bestreut, diese vorerwähnten Staubhäufchen in einer bestimmten Richtung und in bestimmter Entfernung vom Rande stets in einem Kreise auf der Platte sich fortbewegen, gleichsam wie vom Windzuge fortgeweht (Fig. 252). Letzterer ist auch thatsächlich die Ursache dieses Vorganges, und entsteht dieser schräge Impuls durch secundäre Schwingungen, die die Staubpartikelchen in seitlicher Richtung fortschleudern. Je höher der Ton und je kräftiger er hervorgerufen wird, um so rascher erfolgen die Rotationen der Staubwirbel.

Noch andere Erscheinungen, die sich auf schwingenden Platten hervorrufen lassen, wie die »Strehlke'schen Tropfen«, die Faraday'schen Bewegungs- und Luftströmungscurven, die Kundt'schen Reflexfiguren, die Rippen-[1]) und die Flüssigkeitsfiguren[2]), welche alle mehr physikalisches als specifisch akustisches Interesse bieten und sich auch grösstentheils nicht gut zur Demonstration eignen, seien hier blos der Vollständigkeit wegen erwähnt. Ich beschränke mich denn auch darauf, Ihnen die Bildung der Luftströmungscurven zu zeigen. Man bedient sich hiezu der besseren

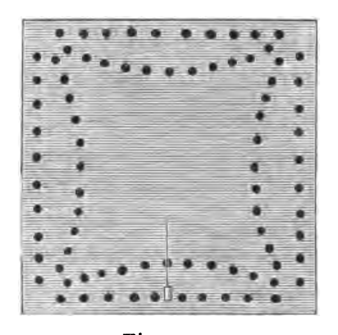


Fig. 253.

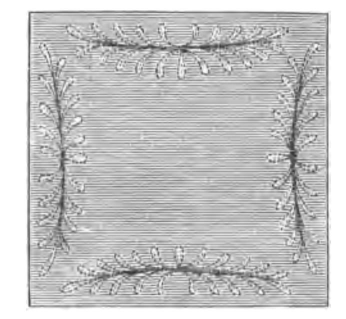


Fig. 254.

Sichtbarkeit wegen einer Tafel aus Kobaltglas, die man, wie Figur 253 andeutet, auf kleine Filzfüsschen stellt, mit winzigen Lycopodiumhäufchen an den angegebenen Punkten versieht und mit dem Streichstäbchen in Schwingung versetzt. Sofort wandern die Häufchen in einander entgegengesetzter Richtung (nämlich zu den, durch die Unterlagen gezogenen Knotenlinien) und ordnen sich zu hübschen, symmetrischen, guirlandenartigen Zeichnungen, wie Figur 254 zeigt.

---

[1]) Diese entstehen auf der Platte, wenn über derselben in geringerem Abstande eine gleich grosse Membrane angebracht wird, die mittels eines durch ihre Mitte gezogenen und mit den beharzten Fingern geriebenen Rosshaares in Schwingung versetzt wird.

Die Platte wird mit Korkfeilicht bestaubt.

[2]) Zu deren Hervorrufung wird eine mit einem Gemenge von Bleiweiss und Weingeist gleichmässig überzogene Platte mittels des Bogens in Schwingung versetzt, worauf man den Spiritus verdampfen lässt und dadurch die Figur fixirt.

38. Vortrag.

(Flächen, krumme. — Glocken. — Erzwungene Schwingungen.)

Wir gelangen nun zur Betrachtung der Schwingungen krumme Flächen. Körper von solcher Gestalt, welche Gestalt man gemeinhi als Rotationsflächen bezeichnet, können in ihrem Durchschnitt alle Formen des Kegelschnittes annehmen und alle Krümmungen de flachbögigen Schale, der Glocke, des Trichters bis zum Cylinde durchlaufen.

Unter allen diesen Formen ist jene der Glocke akustisch di wichtigste. Soweit es sich um metallene, sogenannte Thurmglocken handelt, so kommt deren Verwendung für Cultuszwecke, wie als Zeit oder sonstiges Signal hier nicht weiter in Betracht. Eine musikalische Verwerthung derselben als Glockenspiel (Carillon) hat heute lediglich historisches Interesse. Auf einer Reihe abgestimmter Glocken, in früheren Zeiten durch kunstgewandte »Thürmer« mittels Claviatur, später durch automatische Walzenwerke gespielt, liess man zu bestimmten Tageszeiten geistliche Lieder, mitunter aber auch, wie das Salzburger Glockenspiel beispielsweise solches hören lässt, unverfälschte, allerdings Mozart'sche Opernmelodien erklingen. Solche Glockenspiele, einst ungemein verbreitet, haben sich heute nur noch hie und da, aber längst ihrer auferbauenden Bestimmung entkleidet, erhalten. In Oesterreich dürfte das Salzburgische wohl das letzte sein.

In Orchestern und Theatern werden Glocken mittels des Schlages zum Tönen gebracht, lediglich zu symbolisch-decorativen Zwecken gebraucht.

Auch die Verwendung von Glocken zu musikalischen Zwecken, wenn sie durch Reibung zum Tönen gebracht werden, wozu sich am besten gläserne eignen, gehört vergangenen Zeiten an. Die Glasharmonika, der bedeutendste Repräsentant dieser Gattung (Fig. 255), bestehend aus chromatisch abgestimmten Glasglocken, die auf einer mit Schwungrad versehenen Walze aneinandergereiht und mittels Fusstritt in Rotation versetzt wurden, war eine Vorgängerin der späteren Physharmonika und des heutigen Harmoniums.

Durch Andrücken der befeuchteten Finger auf die Ränder der sich drehenden Glocken werden deren Grundtöne hervorgerufen. Die

Schwerfälligkeit der Ansprache und die vielen Umbequemlichkeiten der Behandlung haben der durchschwingenden Zunge, auf welcher bekanntlich die genannten Nachfolger beruhen, zum leichten Siege über die Glasharmonika verholfen, die man nur noch in Museen findet und wovon Sie ein Exemplar hier sehen und hören können. Ein primitiveres Tonwerkzeug bilden durch eingefülltes Wasser abgestimmte Glasbecher, die durch Bogenstrich zum Tönen gebracht werden. Auf einem solchen, von ihm »Glasmelodion« genannten, 52 Gläser enthaltenden Instrumente producirte sich ein Italiener, Namens Felice Calderazzi, am 13. März 1870 im kleinen Musikvereinssaale.

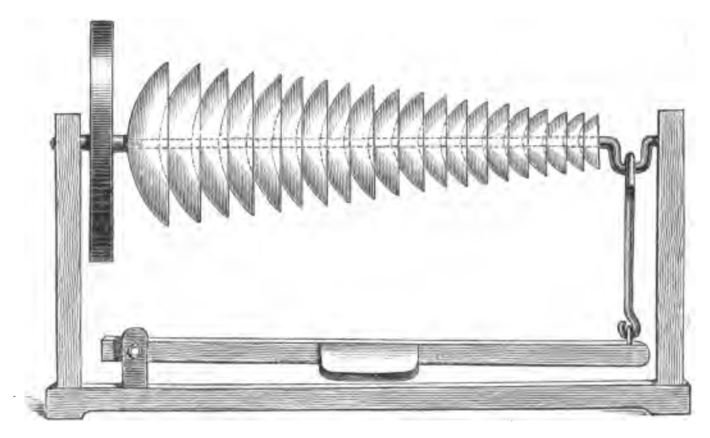


Fig. 255.

Was nun die Schwingungen der Glocken selbst betrifft, so leuchtet ein, dass diese in der Rotationsebene, nicht aber, wie dies bei Ringen der Fall ist, auch senkrecht zur Ebene stattfinden können. Um die Schwingungen hervorzurufen, bedient man sich der Streichstäbchen oder des Bogens, aber nicht des Anschlages, weil bei diesem die Obertöne zugleich mit dem Grundtone auftreten und nicht willkürlich abgeschieden werden können. Die Schwingungen zeigen die grösste, wenn auch nicht vollständige Uebereinstimmung mit jenen geschlossener Ringe, als welche man ihren Rand füglich ansehen darf. Die einfachste, dem Grundtone entsprechende Schwingung ist die, wenn sich die Glocke in Quadranten theilt, also vier Knotenlinien zeigt, die sich vom Rande bis zum Boden senkrecht herabziehen,

und da im Mittelpunkte zusammenlaufen, und es schwingen, wie beim Ringe, die entgegengesetzten Quadranten gleichzeitig nach innen, wenn die angrenzenden nach aussen schwingen und umgekehrt. Der Glockenrand bildet also Ellipsen, deren Durchmesser mit jeder Schwingung abwechselnd der grösste und der kleinste wird, wie Figur 256 dies versinnlicht.

Dass eine Glasglocke solche Formveränderungen ohne Beschädigung erträgt, während der Versuch, eine gleiche Veränderung mittels mechanischer Zusammendrückung oder Ausdehnung hervorzurufen, gleich beim Anbeginne seiner Anwendung das Bersten des Gefässes zur Folge haben würde, erklärt sich aus der Raschheit der Bewegung bei gleichartiger Vertheilung der abwechselnd wirkenden Kräfte, so dass es zu einer Trennung der Molecule nicht kommen kann. Wenn bei heftiger Schwingungserregung dennoch Sprünge vorkommen können (auch das »Zerschreien« von Trinkgläsern, das, wenn das Glas anders fehlerlos ist, wohl schwerlich Jemandem gelingen möchte, gehört hieher), so liegt dies an der Ungleichheit der Textur einer der schwingenden Abtheilungen, der zufolge sie durch die stärkeren gleichsam zerdrückt wird. Aus dieser Ungleichheit erklären sich auch die bei verklingenden Glocken auftretenden Schwebungen, deren Wesen überhaupt den Gegenstand einer eingehenden Betrachtung bilden wird, zu welcher wir später gelangen.

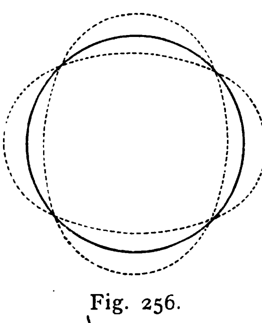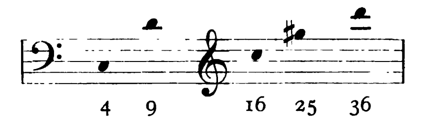


Fig. 256.

Dass eine Glocke in mehreren, jedoch nur geradezahligen Abtheilungen schwingt, und die Bildung dieser Abtheilungen, deren geringste Zahl, gleichwie bei geschlossenen Ringen, nie weniger als vier betragen kann, in immer grösserer Zahl um so leichter erfolgen kann, je grösser der Umfang und je dünner die Wände sind, bedarf keiner weiteren Begründung; denn das für die Bildung der Partialtöne geltende Gesetz ist ein ausnahmsloses, muss also auch hier zur Geltung kommen.

Die Tonfolge entspricht im Allgemeinen den Quadraten von 2, 3, 4 u. s. w., welche, von *C* ausgehend, mit folgenden Intervallen übereinkommen.



Diese Intervallenfolge, die durch Ungleichheiten der Textur und Wanddicke zwar Modificationen erfahren kann, bleibt im Grossen und Ganzen bei jeder Erregungsart dieselbe.

Einen verschiedenen Einfluss äussert die Art der Erregung nur auf das Verhalten der Abtheilungen, beziehungsweise der Knotenlinien. Bringt man die Glocke durch Schlag, Bogenstrich oder Streichstäbchen in radialer Richtung zum Tönen, so bleiben die Knotenlinien und mithin auch die durch sie begrenzten Abtheilungen während des Schwingens an derselben Stelle; wogegen, wenn die Schwingung durch Reibung längs der Peripherie hervorgerufen wird, diese Linien und Abtheilungen jeden Augenblick ihren Standort ändern, indem sie sich um den ganzen Umfang der Glocke in demselben Tempo fortschieben, als es der reibende Körper thut, und es leuchtet ein, dass die vom letzteren berührten Punkte Knotenlinien werden müssen, während an den Angriffspunkten der übrigen Anregungsarten nur Schwingungsmaxima (Bäuche) entstehen können. Bei dieser Erregungsweise, auf welcher das Spielen der Glasharmonika beruht, tritt der Grundton bestimmter als bei jeder anderen auf, wogegen die Obertöne schwerer hervorzurufen sind.

Füllt man ein Glas mit Wasser und klopft an dasselbe während des Füllens mit einem Stäbchen, so findet man, dass sich der Ton zunehmend vertieft.

Man kann sich auf diese Art eine vollständige Scala aus Trinkgläsern abstimmen. Taucht man das gefüllte Glas in ein Wasser enthaltendes Gefäss, so wird der Ton noch mehr vertieft. Dass es die Masse und Dichtigkeit des Wassers ist, welche die Schwingungen erschwert, folglich verlangsamt und sonach den Ton vertieft, erkennt man daraus, dass, wenn man zur Füllung statt Wasser den specifisch leichteren Alkohol verwendet, die Vertiefung des Tones eine geringere wird.[1])

[1]) Eine gleiche Erscheinung bietet eine Stimmgabel (Fig. 257), wenn man sie klingend einmal in ein Wassergefäss und hierauf in ein Gefäss mit Weingeist taucht. Ihr Klang wird gegenüber dem in der atmosphärischen Luft in beiden Fällen vertieft, im ersten mehr, im zweiten

Versetzt man die Flüssigkeit in heftige Bewegung, so kann diese die Schwingungen unter Umständen vollständig paralysiren. Dies wird am bequemsten erreicht, wenn man dem Wasser ein Brausepulver zusetzt. So lange dieses heftig moussirt, wird man der Glocke keinen Ton abgewinnen können.

Die Sichtbarmachung der Schwingungsarten einer Glocke lässt sich auf verschiedene Weise bewerkstelligen.



Fig. 257.



Fig. 258.

Man kann dieselben mittels kleiner leichter Pendel (Fig. 258) ersichtlich machen, die von den Schwingungsbäuchen heftig fortgeschleudert werden, während sie an den Knotenstellen sich kaum be wegen. Auch mittels eines mit dem Tone der Glocke gleich stimmenden Resonators lassen sich die Knotenstellen nachweisen, indem der Resonator, wenn man ihn um den Glockenrand herumführt, an diesen Stellen gleichsam verstummt. Eine andere Art, die Schwingungen nachzuweisen, beruht in deren Uebertragung auf einen über den Glockenrand in der Richtung eines Durchmessers gespannten Faden [1]) (Fig. 259).

---

weniger. Selbstverständlich wird eine in das Wasser mit den Zinkenenden eingeführte Gabel, je tiefer man sie eintaucht, wegen des Widerstandes, welchen ihre Schwingungen dadurch erfahren, immer tiefer klingen, und aus diesem Grunde auch sehr rasch verklingen. Die zunehmende Vertiefung gibt sich durch immer schnellere Schwebungen kund, wenn man eine gleichgestimmte, jedoch nicht eingetauchte Gabel gleichzeitig ertönen lässt.

[1]) Durch grössere oder geringere Spannung des Fadens kann man denselben in gleicher Weise nöthigen, sich in schwingende Abtheilungen zu zerlegen, wie dies mittels des schwingenden Stabes Figur 38 im 4. Vortrage gezeigt wurde.

Von weiteren Methoden seien noch folgende erwähnt.

Streicht man den Rand einer ungefähr bis zur Hälfte mit Wasser gefüllten Glocke (Fig. 260), so kräuselt sich das Wasser an den Stellen des Schwingungsmaximums zu kleinen Bergen, während es an den Knotenstellen ruhig bleibt. Bei heftiger Vibration werden Tropfen emporgeschleudert.



Fig. 259.



Fig. 260.

Auf die Wasserfläche gestreuter Bärlappsamen (Lycopodium) (Fig. 261) gestattet nicht nur ein deutlicheres Erkennen der Knotenlinien, sondern lässt eine gewisse bogenförmige Bewegung der Theil-

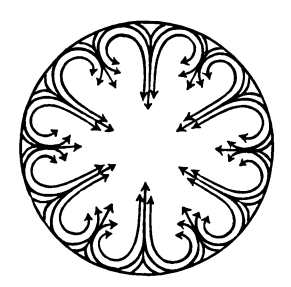


Fig. 261.



Fig. 262 *a*

chen von den Stellen der grössten zu jenen der kleinsten Schwingung wahrnehmen, welche merkwürdige Erscheinung sich in voller Deutlichkeit übersehen und verfolgen lässt, wenn man einen Glascylinder, etwa ein Batterieglas (Fig. 262 *a*), mit Kalkmilch bestreicht, Sand auf die noch nasse Fläche streut und nun den Ton des Gefässes durch starke Bogenstriche weckt und damit nach Bedarf fortfährt.

Die Innenfläche des Glases, aufgerollt gedacht, würde sich wie Figur 262 *b* darstellen. —

Hier dürfte es am Platze sein, einer eigenthümlichen Gruppe ebenflächiger, tönender Körper zu gedenken, die gleichsam den Uebergang von den starren Platten zu den im nächsten Vortrage zu betrachtenden gespannten Membranen bilden.

Es sind dies Körper von solcher Beschaffenheit, dass sie die Form, die man ihnen gibt, eben noch zu behaupten vermögen, ohne einer Spannung zu bedürfen, um periodische Schwingungen ausführen zu können. —



Fig. 262 *b*.

Durch passende Mittel in Schwingung versetzt, lassen sie die ihrer speciellen Beschaffenheit nach Stoff und Grösse eigenthümlichen Töne hören, und diesen Tönen entsprechende Klangfiguren sehen.

Ausser diesen Eigenschwingungen sind aber diese Körper vermöge ihrer sehr geringen Dicke auch geeignet, Schwingungen, die von einem anderen schwingenden Körper auf sie übertragen werden, auszuführen, selbst wenn zwischen der Zahl ihrer Eigenschwingungen und jener der Schwingungen des fremden Körpers wesentliche Unterschiede bestehen.

Damit solche Uebertragungen zustande kommen können, muss nothwendig ein bestimmtes Verhältniss stattfinden zwischen der Angriffskraft des zwingenden und der Widerstandskraft des gezwungenen Körpers.

Auf wie grosse Entfernungen eine durch die Luft gesendete Tonwelle auf eine sensitive Flamme wirkt, haben wir bereits erfahren. Auch die Auer'schen Glühlichter reagiren auf gewisse Töne, bei deren Erklingen ihre Leuchtkraft abnimmt. Ebenso belehrt uns die Erfahrung in jedem Augenblicke über die wunderbare Empfindlichkeit, mit der die vollendetste aller Membranen, das Trommelfell des Ohres, auf die allerverschiedensten Tonwellen reagirt.

Auch an sonstigen Membranen lässt sich der Einfluss durch die Luft fortschreitender Wellen erkennen, aber die Impulse müssen schon in grösserer Nähe und Intensität erfolgen, und bei stärkeren und straff gespannten Fellen wird man selbst in unmittelbarster Nähe damit keine Wirkung erzielen. Dass man einer starren Metall- oder Glasplatte weder in dieser Weise, noch selbst mittels einer

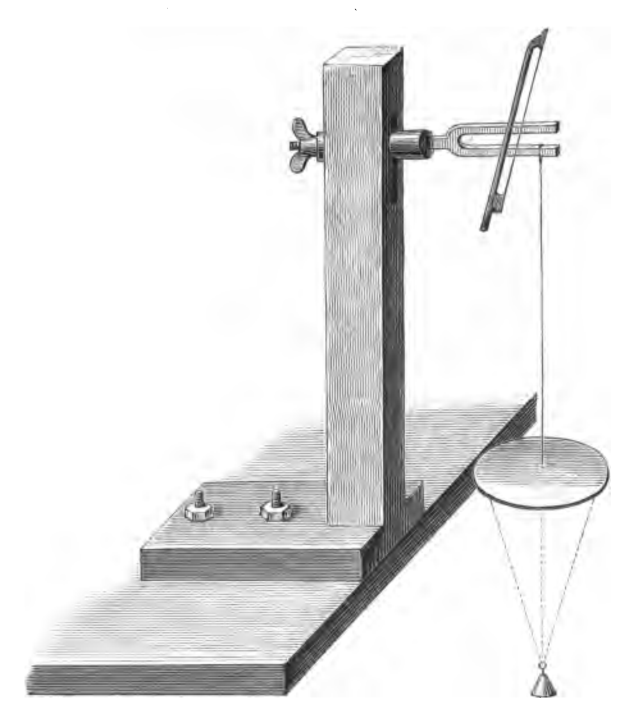


Fig. 263.

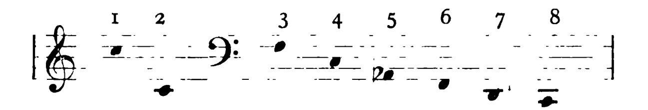
Stimmgabel Schwingungen aufzwingen kann, leuchtet wohl ein, da es hier schon kräftiger, directer Angriffe bedarf, um selbst nur die Eigenschwingungen solcher Platten hervorzurufen.

Wir müssen also für den vorliegenden Zweck — wie gesagt — dünne Platten wählen, und es werden sich hiezu am besten aus schwachem Carton geschnittene Scheiben oder Vierecke verschiedener Grösse eignen, die wir in ihrem Mittelpunkte an einen Faden befestigen und diesen mit einer Stimmgabel verbinden. Letztere, in

der Figur 263 angedeuteten Art befestigt und mittels des Bogens in Schwingung gesetzt, überträgt ihre Vibrationen auf den freihängenden Carton und ruft auf diesem — wenn man ihn mit etwas Sand bestreut — Klangfiguren hervor, die von der Grösse der Platte oder der Höhe des Stimmgabeltones abhängen.

Ein längeres Verweilen bei diesen, für den Physiker sehr lehrreichen Experimentaluntersuchungen hätte in dieser Richtung für uns keinen Zweck, da sie schon mit Rücksicht auf das denselben zu Grunde liegende Material zu keinem Ergebnisse zu führen geeignet erscheinen, das für die praktische Musik von irgend welchem Belang wäre. Näheres hierüber findet sich in der »Lehre vom Schall«, von Dr. Elsass.

Nach einer Richtung führen diese Experimente allerdings zu einer akustischen Erscheinung, die auch das Interesse des Musikers zu erregen vermag. Wenn wir nämlich eine solche Scheibe den starken Schwingungen einer grösseren Stimmgabel aussetzen und die Spannung des Fadens zwischen Gabel und Scheibe in mannigfaltiger Weise abändern, so werden wir bei einiger Uebung im Stande sein, eine Reihe von Untertönen hervorzurufen, die gleich den Obertönen von Saiten oder offenen Pfeifen genau dem Gesetze der natürlichen Zahlen folgen, so dass, wenn der Gabelton beispielsweise gleich c^2 wäre, die Aufeinanderfolge der Untertöne lauten würde:



Diese Erscheinung, die wir schon bei den Stimmgabeln kennen lernten, erklärt sich sehr einfach durch Intermittirung in der Uebertragung der einzelnen Vibration der Gabel auf die Scheibe und beruht in dem Maasse der Spannung des Fadens, mit welchem die Scheibe nach unten festgehalten und dadurch in ihren verticalen Bewegungen mehr oder weniger gehemmt wird. Bei der dem Tone 1 entsprechenden stärksten Spannung wirkt jede einzelne Vibration auf den Faden; bei geringerer Spannung wird erst jede zweite, bei noch schwächerer jede dritte u. s. w. Aufwärtsschwingung der Gabelzinke die Scheibe treffen, weil dieselbe bei Verminderung der Spannung durch die Schwingung der Gabel immer höher geschleudert wird, und

in der Zwischenzeit, bis sie wieder zurücksinkt, je nach Umständen zwei, drei, vier u. s. w. solche Schwingungen der Gabel stattgefunden haben, die mithin auf die Scheibe keine Wirkung ausüben konnten.

39. Vortrag.

(Membranen.)

Wir gelangen nun zur Betrachtung der eigentlichen Membranen.

Lassen wir eine Platte von beliebiger Configuration immer dünner werden, bis sie das Vermögen einbüsst, durch eigene Steifigkeit elastisch zu bleiben, und die folglich über einen Rahmen von gleichviel welcher Gestalt gespannt werden muss, um wieder elastisch zu werden und periodische Schwingungen ausführen zu können, so haben wir die Platte in eine Membrane übergeführt.

Mit diesem Worte bezeichnet der Akustiker jeden Stoff von solcher Beschaffenheit, dass er, gleichwie die Saite, gespannt werden muss, um periodischer Schwingungen fähig zu sein, ohne dass es unbedingt nöthig wäre, dass diese Schwingungen auch wirklich hörbar werden, wie dies beispielsweise der Fall ist, wenn man es mit Flüssigkeitshäutchen [1]), etwa Seifenblasen, zu thun hat. Membranen können aus thierischen Häuten und Blasen (Pergament, Goldschlägerhäutchen), aus dünn gewalzten oder geschlagenen Metallen [2]), aus Kautschuk, aus Collodium, endlich aus den verschiedensten in Papierform gebrachten organischen Stoffen hergestellt werden.

Als Membranen zur Herstellung krustischer Instrumente kommen blos gegerbte thierische Felle in Verwendung, mit welchen die offenen Enden cylindrischer oder kesselförmiger Gefässe beiderseits, wie bei Trommeln, oder nur an einem Ende, wie bei Pauken und Tambourinen, überspannt werden.

Instrumente dieser Art reichen im Alter vielleicht weiter zurück, als dies bei irgend einem anderen Tonwerkzeuge der Fall sein dürfte.

---

[1]) Seifenwasser, Glycerin, Gelatine und ein Tropfen Ammoniak.

[2]) Uneigentlich werden auch Metallscheiben, die einer Spannung nicht bedürfen, wie beispielsweise die in der Telephonie gebräuchlichen, Membranen genannt.

Man hat noch kein Volk kennen gelernt, bei dem nicht ein trommel- oder paukenähnliches Instrument vorkäme, woraus den Schluss zu ziehen wohl gestattet sein möchte, dass von den constituirenden Elementen der Musik: Rhythmus, Melodie und Harmonie, ersterer dasjenige ist, für welches auch den rohesten, primitivsten Menschen es weder an Sinn noch Empfänglichkeit fehlt, was sich dadurch erklären liesse, dass der Rhythmus in physiologischen Functionen unseres Körpers, im Gehen, Athmen und im Pulsschlage, Analogien findet, während das Verständniss für Melodie eine mehr oder minder unbewusste, jenes für Harmonie eine mehr oder minder bewusste Thätigkeit der Seele erheischt. Wenn rohe Völker es bis zur Melodie bringen, so ist sie überaus arm an Tonschritten, daher monoton, während der Rhythmus mannigfaltig wechselt. Dass sich auch im Rhythmus Stimmungen der Seele äussern können, ist nicht zu bezweifeln, denn langsame Rhythmen werden wohl von Niemand als der Ausdruck der Freude und lebhafte ebensowenig als Merkmal der Trauer empfunden werden.

Weiteres hierüber gehört in das Gebiet der Psychologie und Aesthetik.

Nehmen auch die Schlaginstrumente in der praktischen Musik einen nur untergeordneten Rang ein, so können sie bei richtiger Anwendung nichtsdestoweniger bedeutende charakteristische Wirkungen hervorbringen. Um zu erkennen, welche symbolische Bedeutung einem Trommelwirbel innewohnen kann, bedarf es nur der Erinnerung an »Egmont«, »Struensee«, »Wallenstein«. Was könnte die Schauer des Kerkers ergreifender schildern, als die Art, wie Beethoven die Pauke in der Einleitung zum zweiten Acte des Fidelio verwendet. In Meyerbeer's »Propheten« symbolisirt die Pauke die stürmischen Herzschläge des von der Mutter sich losreissenden Sohnes. Nationaltänze südlicher Völker sind ohne Tambourinen nicht denkbar.

Die Membranen aller dieser Instrumente werden bekanntlich durch Schlag, mitunter auch, wie beim Tambourin, durch intermittirende Stösse mittels des reibenden Fingerwulstes in Schwingung versetzt. Um Töne von unterscheidbarem Klange, entsprechender Schallkraft und — innerhalb einer den Umfang einer Quarte nicht überschreitenden Grenze — von bestimmter Höhe hervorzubringen,

müssen die Membranen über einen hohlen, eine entsprechende Luftmasse umschliessenden und dadurch resonirenden Körper gespannt und mit einer Vorrichtung versehen sein, um die Spannung steigern oder vermindern zu können.

Unter diesen Instrumenten ist es nur die Pauke (Timpano), die mit Rücksicht auf ihre Verwendung in bestimmten Tönen wie auf ihre Stimmbarkeit als ein musikalisches Werkzeug bezeichnet werden kann. Man benöthigt ihrer gewöhnlich zwei (zuweilen auch mehr) von verschiedener Grösse, und sie umfassen zusammen eine Octave zwischen dem grossen und kleinen *f*.

Wiewohl sich gespannten Membranen mit geeigneten Mitteln eine Reihe von Obertönen abgewinnen lässt, so kann bei Schlaginstrumenten in Folge der, die Entwicklung von Partialschwingungen verhindernden Erregungsart durch den, die Membrane in ihrer Gänze erschütternden Schlag nur der Grundton in Betracht kommen.

Der Paukenschlag wird nicht auf die Mitte, sondern mehr nahe dem Rande des Felles geführt, weil der Klang in Folge der auf diese Weise geweckten Obertöne heller und musikalisch bestimmter wird, während bei central geführtem Schlage selbst der Grundton unvollkommen zur Entwicklung gelangt, indem der Schlägel auch beim kürzesten Schlage während des Rückschwingens des getroffenen Felles noch auf diesem ruht und dadurch die Schwingungen hemmt. Uebrigens kann auch der dumpfere, gleichsam erstickte Ton des in der Mitte getroffenen Felles unter Umständen einer beabsichtigten Wirkung entsprechen. Weitere Varianten der Klangfarbe werden durch mehr oder weniger dämpfende Ueberzüge der Schlägel (Leder, Filz) erzielt. Die heutigen, durch einen Hebelmechanismus vervollkommneten Pauken lassen ein rasches und sicheres Umstimmen zu. Bei Trommeln wird der Schlag stets auf die Mitte des Felles geführt, weil es sich da nicht um den Ton des oberen (Schlag-) Felles, sondern um die möglichst kräftige Erschütterung des unteren (Schall-) Felles und der quer über dasselbe gespannten, den bekannten rasselnden Schall erzeugenden Doppelsaite handelt.

Auch beim Tambourin kommt sowohl vermöge der klatschenden Art des Schlages, als auch in Folge der Ueberlärmung durch die in Reifen angebrachten Metallschellen der Eigenton weder in Betracht noch zur Geltung.

Eine bedeutendere Rolle, als in der Musik, spielen die Membranen in der physikalischen und ganz besonders in der physiologischen Akustik. Ihrer hohen Wichtigkeit in letzterer Beziehung sich sofort bewusst zu werden, bedarf es blos der Erinnerung an zwei membranöse Gebilde, nämlich das Trommelfell des Ohres, ohne welches alles Hörbare für uns nicht existiren würde, und die Stimmbänder, ohne die wir weder sprechen noch singen könnten.

Wollen wir nun die Schwingungsgesetze für gespannte Membranen erforschen, so wird es nothwendig und auch durchwegs möglich sein, sich minder energischer Erregungsmittel, als des Schlagens, zu bedienen, weil einerseits hier häufig sehr zarte Membranen in Anwendung kommen, die auch dem leisesten Schlage keinen Widerstand würden leisten können, und andererseits die Hervorrufung weit hörbarer, ja unter Umständen selbst nur tönender Schwingungen nicht den wesentlichen Zweck von Untersuchungen dieser Art bildet.

Die hierbei in Anwendung kommenden Erregungsarten sind:

1. Die Zerrung behufs Hervorrufung der Eigentöne.

2. Die Uebertragung der Schwingungen fremder tönender Körper.

3. Die Erschütterung durch Luftströme.

Als Erregungsmittel können in Anwendung kommen:

Im ersten Falle: der Bogen, das Streichstäbchen, das Pferdehaar.

Im zweiten Falle: Stimmgabeln, Platten, Pfeifen, Sirenenscheiben oder sonstige tönende Körper.

Im dritten Falle: auf die Membrane gerichtete Ströme verdichteter Luft.

Die zweite Erregungsart findet beim Hören, die dritte beim Singen und Sprechen statt.

Wir wollen nun jeder dieser Methoden experimentell näher treten, uns hierbei jedoch auf quadratische und runde Membranen beschränken.

Zunächst entsteht die Frage: Wie kommen die Schwingungen zu Stande und wie gelangen sie zur Wahrnehmung?

In Bezug auf ersteres leuchtet ein, dass, gleichviel ob es sich um die Hervorrufung der eigenen oder erzwungener Schwingungen handelt, in jedem Falle eine Erschütterung der Membrane statt-

findet, die, an welcher Stelle sie auch erfolgen möge, als Welle bis zur Begrenzung fortschreitet, von der sie zurückgeworfen wird, und mit den vom Erregungscentrum weiters ausgehenden directen Wellen interferirt, wonach an allen solchen Begegnungsstellen sogenannte Knotenlinien (Stellen der völligen Ruhe oder doch von geringer Bewegung) entstehen müssen.

Diese Interferenzgebilde können, wie bei Platten, durch aufgestreuten Sand, und ebenso die Stellen der grössten Bewegung durch leichtes Pulver sichtbar gemacht werden.

Die Zahl der auf einer und derselben Membrane durch erzwungene Schwingungen hervorrufbaren Sandfiguren ist eine überaus grosse.

Die geringste Aenderung der Schwingungszahl des erregenden Körpers genügt, um eine andere Figur zu erzwingen.

Es erklärt sich hieraus, dass es für die vollkommenste aller Membranen, das Trommelfell des Ohres, keinen Ton geben könne, mit dem sie nicht im Einklange zu schwingen vermöchte.

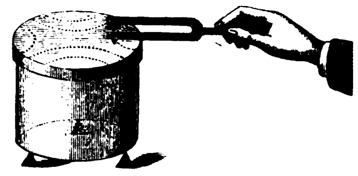


Fig. 264.

Da bei solcher Erregungsart die Membrane immer nur in dem Tone des Erregers erklingt, so können ihre Eigentöne nur dann zur Geltung kommen, wenn der Grundton oder einer der Partialtöne des Erregers mit einem dieser Eigentöne zusammenfällt, in welchem Falle sich auch die Sandfigur rascher und vollkommener ausbildet.[1]). Zu diesem Versuche eignet sich der nächstbeste offene, an einem Ende mit einer straff gespannten Papiermembrane geschlossene Cylinder, etwa der in Figur 264 dargestellte. Man bestreut die Membrane mit etwas Sand[2]) und experimentirt nun mit kleinen Stimmgabeln (verschiedener Tonhöhen), an deren eine Zinke man an der Aussenseite (ganz zu oberst) ein kleines Stückchen weichen Filzes mit Klebwachs

[1]) Auch vom Trommelfell des Ohres wird behauptet, dass es Eigentöne habe. Ist dem so, so müssten sie eingedenk der Kleinheit dieses Gebildes nothwendig sehr hoch liegen.

[2]) Es sei hier bemerkt, dass zu allen Versuchen mit Sand sich der Sichtbarkeit wegen am besten der sogenannte blaue Streusand eignet, wenn er vorher durch Schlämmen im Wasser staubfrei gemacht und hierauf vollkommen getrocknet wurde.

befestigt. Jede der Gabeln wird an sich, und ausserdem je nach dem mit dem Filze berührten Punkte der Membrane eine andere Sandfigur hervorrufen.

Um die Eigenschwingungen einer Membrane ertönen zu machen, muss man sich der ersten oder dritten Methode bedienen. Für die erste eignet sich am vorzüglichsten das Streichstäbchen. Mittels desselben kann man auf grossen Membranen (Fig. 265) Partialtöne bis zum sechsten und noch höher hinauf hervorbringen, wenn man das Stäbchen an verschiedenen Punkten befestigt.

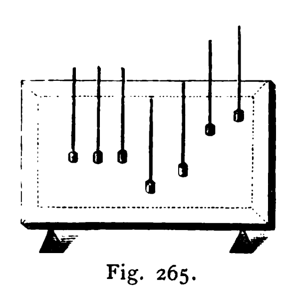


Fig. 265.

Die Methode, wie mittels des Pferdehaares Membranen in Schwingung versetzt werden, wurde Ihnen schon früher gezeigt.

Auch der Bogen lässt sich zur Erschütterung von Membranen anwenden. Man streicht den auf Korkfüssen ruhenden (quadratischen

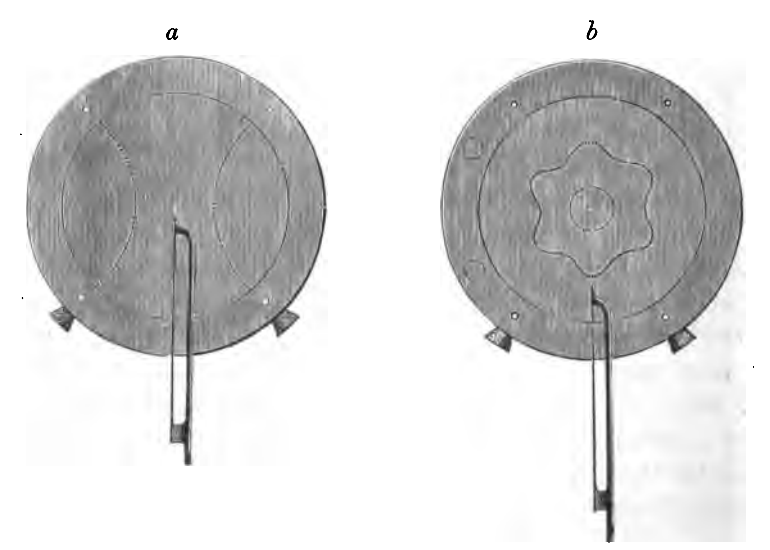


Fig. 266.

oder runden) Rahmen, über welchen die Membrane gespannt ist, senkrecht zu seiner Ebene, wobei sich je nach der Art des Angriffes und der Dämpfung verschiedene, Obertönen entsprechende Figuren hervorrufen lassen, wie beispielsweise *a* und *b*, Figur 266.

Die Eigentöne der Membranen folgen verwickelten, zum Theile noch nicht hinlänglich festgestellten Gesetzen, deren Erforschung durch den Umstand, dass es selten gelingt, Membranen von vollkommen gleicher Textur und Spannung herzustellen, sowie durch die Unbeständigkeit der letzteren in Folge ihrer hygroskopischen Eigenschaft sehr erschwert wird. In allen Fällen aber bilden die Obertöne eine unharmonische Folge [1]) und sie liegen ausserdem bald so nahe beisammen, dass die Membranentöne schon aus diesem Grunde zu musikalischer Verwendung nicht geeignet erscheinen. Die

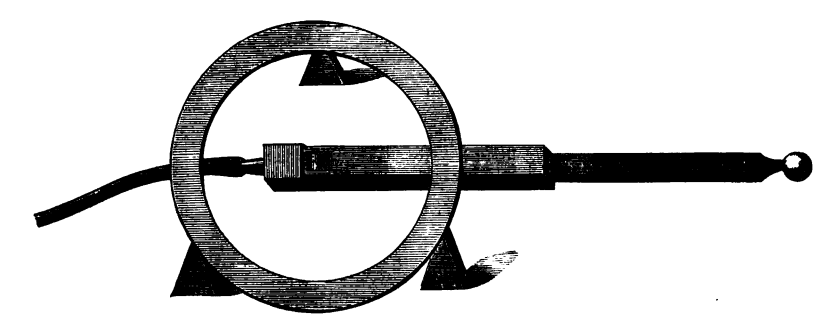


Fig. 267.

zuverlässigste, weil mechanische Angriffe durch Bogen und Streichstäbchen ausschliessende und lediglich auf der Resonanz beruhende Methode, die Eigentöne einer bestimmten Membrane genau zu ermitteln, dürfte darin bestehen, dass man die Membrane über einer sogenannten Stimmpfeife derart fixirt (Fig. 267), dass sich das Labium der letzteren genau unter der Mitte der Membrane, die man mit etwas Sand bestreut, in einer Entfernung von 4—5 Centimetern be-

---

[1]) Wird c^0 als Grundton angenommen, so lauten die folgenden Theiltöne gis^0, c^1, d^1-, e^1+, fis^1+, g^1. Melde hat gefunden, und zwar, für quadratische Membranen *c*, *gis*, *d*—, *e*+, *fis*+, *g*; für runde *c*, *g*+, *a*, *d*+, *f*—, *g*— (theoretisch), *c*, *c*+, *g*, *gis*+, *c*, *cis* (nach praktischen Versuchen). Dagegen fanden Wüllner für runde Membranen *c*, *gis*, *a*, *cis*, *a*, *f* und Helmholtz *c*, *as*, *cis*+, *d*+, *g*—, *b*—. Elsass für quadratische:

C	gis	c	d	$e+$
$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$	$\sqrt{8}$	$\sqrt{10}$	$\sqrt{13}$
1·414,	2·236,	2·828,	3·162,	3·606,

für runde *c*, *as*, *cis*, *d*+, *f*—.

Diese Verschiedenheiten beweisen die Schwierigkeit, sichere Resultate zu erlangen und daraus Gesetze abzuleiten.

findet.[1]) Wird der Ton der in ihrer Lage befestigten, mit einem dauernd und gleichmässig thätigen Gebläse verbundenen Pfeife durch immer tieferes Einführen des Stimmpfropfes allmälig erhöht[2]), so wird bei allen Tönen der Pfeife, die einen der Eigentöne der Membrane weckten, augenblicklich eine bestimmte Sandfigur sich bilden, während bei den Zwischenräumen der Sand unbewegt bleibt. — Statt der Pfeife kann man auch eine von unten angeblasene, wagrecht rotirende Sirenenscheibe mit gleichem Erfolge anwenden; nur ist es hier nicht gut möglich, die jeweilige Höhe des anregenden Tones zu bestimmen, weil man den Ton nicht, wie bei der Pfeife, an- und festhalten kann, um ihn zu messen.



Fig. 268.

Um die dritte Methode anzuwenden, wird man sich am besten eines in Figur 268 angedeuteten Apparates bedienen, der in der Hauptsache aus einem beiderseits offenen, weiten Glascylinder besteht, dessen eine Seite durch eine, über einen starken Metallring nicht zu straff gespannte Membrane verschlossen wird. Der Ring ist in gleichen Abständen an vier Stellen durchbohrt. Vier derart gebogene Drähte, dass sie in den unteren Rand eingreifen, werden durch die Ringöffnungen gesteckt und ermöglichen, da sie hier mit Gewinde versehen sind, eine beliebige Spannung der Membrane mittels Muttern. Leitet man durch ein Röhrchen, dessen Mündung der Membrane möglichst nahe gebracht wird, aus einem Gebläse einen Strom verdichteter Luft, so wird die Membrane in heftige Erschütterungen gerathen und Töne hören lassen, die je nach der Grösse und Spannung der Membrane und der Intensität des Winddruckes von überraschender Mächtigkeit sein können. Eine besondere Annehmlichkeit lässt sich ihnen allerdings kaum nachrühmen.

---

[1]) Zur besseren Uebersicht der Anordnung des Apparates ist der Ring ohne Membrane dargestellt.

Dass diese Versuche auch mit, über rechteckige oder anders geformte Rahmen gespannten Membranen gemacht werden können, ist selbstverständlich.

[2]) Um, wenn der Pfropf bereits am Labium angelangt ist, eine Serie höherer Töne zu erhalten, lässt man die Pfeife durch Anwendung stärkeren Winddruckes überblasen.

Der mechanische Schwingungsvorgang gleicht jenem der Stimmbänder oder vibrirender Lippen. Die verdichtete Luft im Röhrchen drängt die dessen Mündung berührende Membrane aus ihrer Ruhelage. Die Luft kann demzufolge entweichen und die Membrane zurückschwingen, wobei sie auf die Mündung aufschlägt und wodurch, gleichwie bei aufschlagenden Zungenpfeifen, das den Klang charakterisirende Gerassel entsteht. Die Tonhöhe kann durch Spannung der Membrane nach Art einer Pauke im Umfange mehrerer Töne abgeändert werden.

Spannen wir über einen Glastrichter eine Thierblase oder ein Goldschlägerhäutchen und bringen nahe dem Rande der (trocken gewordenen) Membrane einen radialen Schlitz von 6—7 Millimeter Länge an (Fig. 269).

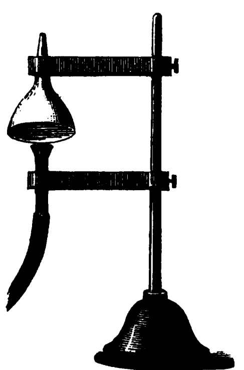


Fig. 269.

Befestigen wir den Trichter in verkehrter Lage, so dass die Membrane nach unten eine horizontale Ebene bildet, und leiten wir mittels eines am Ende plattgedrückten Röhrchens einen Luftstrahl senkrecht auf die durch den Schlitz gebildete Spalte, so dass beide Schnittränder in Schwingung gerathen, so stehen wir vor einer, der Function der Stimmbänder analogen Art von Tonerzeugung. Der so entstehende Ton wird seiner Höhe nach abhängig sein von der Länge des Schlitzes und der Spannung der Membrane. Vermehren wir letztere oder verkürzen wir die Länge des Schlitzes durch Dämpfung, so steigt der Ton; ermässigen wir die Spannung, wozu ein Hauch des Mundes für eine momentane Wirkung genügt, so wird der Ton tiefer.

Geben wir dem Ablasestrome eine seitliche Richtung zu dem Schlitze, so dass nur einer der Spaltränder in Vibration geräth, und bringen wir in das Gefäss ein Korkkügelchen, so wird letzteres längs der Wand des Trichters mit grosser Schnelligkeit im Kreise umherrollen, und zwar stets in der Richtung, in welcher der Luftstrom eintritt.

Die Umkehrung der Rotationsrichtung wird jedesmal von dem Tone des betreffenden Spaltenrandes begleitet. Ob der Kreislauf

der Kugel durch die mechanische Gewalt des seitlich eintretenden Luftstromes, oder durch ein System umlaufender, aus den Schwingungen des tönenden Spaltenrandes resultirender Wellenbewegungen bewirkt wird, bleibe hier ununtersucht.

In rein physikalisch-akustischer Hinsicht gehören die Membranen vermöge ihrer Eigenschaft, auf Schallstösse leicht zu reagiren, zu den vorzüglichsten Behelfen für manometrische Demonstrationen der Schallwellen mittels Sand- oder Flammenbilder. Mit entsprechenden Luftsäulen verbunden, dienen sie zur Analyse der Klänge mittels Resonanz.



Fig. 270.

Wird eine wagrecht befestigte Röhre (Fig. 270) an einem Ende mit einer Membrane verschlossen, und am Rande ein feiner Faden befestigt, an dem ein bis zur Mitte der Membrane reichendes und an dieselbe sich anlehnendes Kügelchen hängt, so wird dieses heftig weggeschleudert, sobald eine Schallwelle in die Röhre eintritt, die dem Tone der Röhre entspricht. Die Ihnen bereits bekannten Helmholtz-schen Resonatoren bieten für das Ohr allerdings ein noch empfindlicheres Mittel für die Klanganalyse und Nachweisung der Obertöne. —

Mit der Erwähnung einer besonderen Erscheinung an gespannten Membranen wollen wir die Betrachtung der Schwingungen dieser Gebilde beschliessen. Es sind dies durch tönende Platten hervorgerufene Reflexfiguren, eine Bezeichnung, die dadurch gerechtfertigt erscheint, dass mit einer und derselben Klangfigur der Platte eine und dieselbe Reflexfigur auf der Membrane auftritt, die jedoch mit der Plattenfigur keine Uebereinstimmung zeigt, wie dies aus Figur 271 zu ersehen.

Sowohl in Folge dieser Incongruenz, wie auch wegen der grossen Regelmässigkeit, Schärfe, Mannigfaltigkeit und Eigenthümlichkeit ihrer Zeichnung bilden diese Figuren eine interessante Erscheinung, deren näherer Zusammenhang zu den der Untersuchung noch harrenden Fragen der Akustik zählt. Einige Proben der Erscheinung selbst will ich Ihnen jetzt vorführen.

Die Figuren werden jedenfalls durch Uebereinstimmung des Plattentones mit einem der Partialtöne der Membrane hervorgerufen, was dadurch bewiesen wird, dass sich dieselbe Figur mittels einer Pfeife oder Stimmgabel, die mit dem Plattentone unisono sind, eben-

falls hervorrufen lässt, wiewohl auch hier Varietäten auftreten, die von der Art der Erregung abhängig zu sein scheinen.

Wenn diese Uebereinstimmung von gleichem Tone mit gleicher Figur bei einer und derselben Membrane nicht immer erfolgt, so liegt dies an der durch thermische oder hygroskopische Einflüsse modificirten Spannung der Membrane. —

Endlich wollen wir noch eine Art Klangfiguren kennen lernen, die man durch die Schwingungen von sozusagen körperlosen

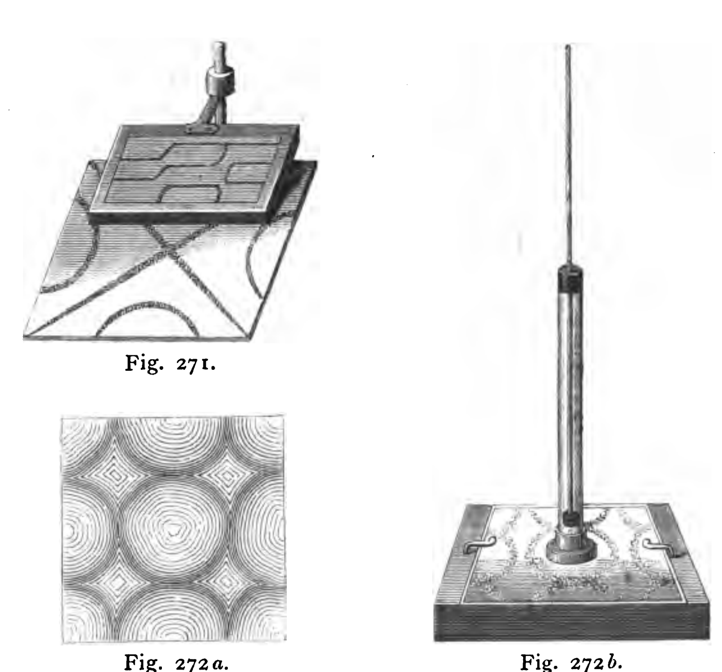


Fig. 271.

Fig. 272 *a*.

Fig. 272 *b*.

Flächen hervorrufen kann, nämlich mittels sogenannter Luftplatten, eine Erscheinung, deren Entdeckung ebenfalls Kundt zu danken ist. Es handelt sich hier darum, eine flächenförmige dünne Luftschichte in stehende Schwingungen zu versetzen, durch welche sich auf einer Platte vertheiltes Korkfeilicht oder Kieselsäurepulver zu bestimmten Figuren ordnet (Fig. 272 *a*). Die Erregung wird durch die Schwingungen eines longitudinal tönenden Stabes (Fig. 272 *b*) bewirkt, dessen Korkscheibe die vibratorischen Bewegungen zu förmlichen Luftstössen verdichtet, die, ihren Weg durch die in der Mitte der Deckplatte

angebrachte Oeffnung nehmend, das auf der Unterplatte vertheilte Pulver zu Figuren ordnen. Die Figuren werden ein mehr oder minder deutliches Gepräge aufweisen, je mehr der Stabton mit einem der Theiltöne der Luftplatte übereinkommt. Ausserdem werden sie andere sein, je nachdem der Raum zwischen Ober- und Unterplatte [1]) ganz offen, theilweise oder ganz abgeschlossen ist. Im letzteren Falle zeigen die Figuren grosse Uebereinstimmung mit jenen starrer Platten.

* * *

Hiermit schliesst der physikalische Theil unserer Umschau auf dem Gebiete des Klanges und wir gelangen nun zum physiologischen Theile, der von der Tonempfindung handelt, und womit wir das nächstemal beginnen wollen.

[1]) Je geringer der räumliche Abstand beider Platten ist, je dünner demnach die »Luftplatte« wird, um so rascher entstehen die Staubgebilde und um so schärfer prägen sie sich aus.

